



Heft 87, 2020

WSL Berichte

ISSN 2296-3456

Oberflächenmodelle aus Luftbildern für forstliche Anwendungen

Leitfaden AFL 2020

Jörg Ackermann, Petra Adler, Christian Aufreiter,
Christoph Bauerhansl, Tilman Bucher, Stefan Franz,
Friedrich Engels, Christian Ginzler, Karina Hoffmann,
Kai Jütte, Hartmut Kenneweg, Tatjana Koukal, Klaus Martin,
Katja Oehmichen, Olaf Rüffer, Herbert Sagischewski,
Rudolf Seitz, Christoph Straub, Gregor Tintrup, Lars Waser,
Katarzyna Zielewska-Büttner

Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
CH-8903 Birmensdorf

Heft 87, 2020

WSL Berichte

ISSN 2296-3456

Oberflächenmodelle aus Luftbildern für forstliche Anwendungen

Leitfaden AFL 2020

Jörg Ackermann, Petra Adler, Christian Aufreiter,
Christoph Bauerhansl, Tilman Bucher, Stefan Franz,
Friedrich Engels, Christian Ginzler, Karina Hoffmann,
Kai Jütte, Hartmut Kenneweg, Tatjana Koukal, Klaus Martin,
Katja Oehmichen, Olaf Rüffer, Herbert Sagischewski,
Rudolf Seitz, Christoph Straub, Gregor Tintrup, Lars Waser,
Katarzyna Zielewska-Büttner

Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
CH-8903 Birmensdorf

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe
Prof. Dr. Konrad Steffen, Direktor WSL

Verantwortlich für dieses Heft
Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten. Lars Waser, wissenschaftlicher
Mitarbeiter Gruppe Fernerkundung, WSL.
Matthias Bürgi, Leiter Forschungseinheit Landschaftsdynamik, WSL

Schriftleitung: Sandra Gurzeler, Teamleiterin Publikationen, WSL

Lektorat: Christine Huovinen

Layout: Jacqueline Annen

Zitiervorschlag:

ACKERMANN, J.; ADLER, P.; AUFREITER, C.; BAUERHANS, C.; BUCHER, T.; FRANZ, S.; ENGELS, F.;
GINZLER, C.; HOFFMANN, K.; JÜTTE, K.; KENNEWEG, H.; KOUKAL, T.; MARTIN, K.; OEHMICHEN, K.;
RÜFFER, O.; SAGISCHEWSKI, H.; SEITZ, R.; STRAUB, C.; TINTRUP, G.; WASER, L.; ZIELEWSKA-BÜTTNER,
K., 2020: Oberflächenmodelle aus Luftbildern für forstliche Anwendungen. Leitfaden
AFL 2020. WSL Ber. 87. 60 S.

ISSN 2296-3448 (Print)
ISSN 2296-3456 (Online)

Fotos Umschlag:

Übergang vom Falschfarbarbeninfrarot Luftbild zum Vegetationshöhenmodell für einen
Ausschnitt aus dem schweizerischen Mittelland. Das Vegetationshöhenmodell basiert
auf Stereo-Luftbildern vom ADS80 Zeilensensor. Die verschiedenen Vegetationshöhen
sind hellgrün (niedrig) bis dunkelgrün (hoch) eingefärbt. Quelle: swisstopo, LFI 2019.

Forschung für Mensch und Umwelt: Die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und
Landschaft WSL überwacht und erforscht Wald, Landschaft, Biodiversität, Naturgefahren
sowie Schnee und Eis. Sie ist ein Forschungsinstitut des Bundes und gehört zum ETH-Bereich.
Das WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF ist seit 1989 Teil der WSL.

© Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Birmensdorf, 2020

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Grundlegende Informationen zu Höhenmodellen	9
3	Eingangsdaten für die Ableitung von Oberflächenmodellen	11
3.1	Digitale Luftbilder	11
3.1.1	Allgemeine Rahmenbedingungen von Bildflügen	11
3.1.2	Eigenschaften digitaler Luftbilder	12
3.1.3	Orientierungsdaten	15
4	Automatisierte Ableitung von Höheninformationen aus Luftbildern	17
4.1	Bildorientierung	18
4.1.1	Innere Orientierung	18
4.1.2	Äussere Orientierung	18
4.1.3	Aerotriangulation	18
4.2	Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen mittels Image Matching	19
4.3	Qualitätsparameter und Qualitätsbeurteilung	19
4.3.1	Visuelle Beurteilung	20
4.3.2	Quantitative Beurteilung	20
4.4	Metadaten	21
5	Forstliche Anwendungen von Oberflächenmodellen	23
5.1	Ableitung von forstlichen Kenngrössen	23
5.1.1	Unterscheidung Wald/Nichtwald	23
5.1.2	Kartierung von Lücken	24
5.1.3	Einzelbaumhöhen	27
5.1.4	Bestandeshöhe aus Vegetationshöhensegmenten	29
5.1.5	Überschirmungsgrad	31
5.1.6	Überhälter und Restbestockung	32
5.2	Entwicklung von statistischen Modellen	32
5.3	Monitoring und Zeitreihenanalyse	34
5.4	Aktuelle Praxisbeispiele	37
5.4.1	Erfassung von Waldzustandsdaten für den Gesamtwald Sachsens	37
5.4.2	Oberflächenmodelle für die Forsteinrichtung	38
5.4.3	Waldmaske Schweiz und Österreich	39
5.4.4	Moderne Informationstechnologien für die Forsteinrichtung und Waldbewirtschaftung	41
5.4.5	Automatisierte Erfassung von Sturmschadensflächen am Beispiel des Sommersturms Kalle	42
5.4.6	Monitoring von Waldentwicklung in Naturwäldern (Brandenburg)	42
5.4.7	Monitoring des Grünvolumens für die Landeshauptstadt Potsdam in den Zeitschnitten 1992, 1998, 2004, 2010	43
5.4.8	Praxisbeispiel: Landschaftserfassung NATFLO-MAD	44
5.4.9	Erfassung von Auerhuhn-relevanten Biotopstrukturen	46
6	Trägerplattformen für Luftbildkameras	49
6.1	Bemannte Flugzeuge mit Mittel- oder Grossbildkamera	49
6.2	Bemannte Kleinflugzeuge und Fluggeräte mit Mittel- oder Kleinbildkamera	49
6.3	Unbemannte Luftfahrzeuge mit Klein- und Kleinstbildkameras	50
7	Nutzung anderer Quellen für die Berechnung von Oberflächenmodellen	51
7.1	Stereofähige optische Satelliten	51
7.2	Flugzeuggetragene Laserscannerdaten	51
7.3	Radarfernerkundung	52

8	Literatur	53
9	Relevante Normen und Standards	56
10	Abkürzungen	56
11	Glossar	57
12	Autorinnen und Autoren	58

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Veranschaulichung von DGM (grau) und DOM (blau). (Quelle: L. Waser, WSL)	9
Abb. 2: Veranschaulichung von nDOM (rot schraffiert) und VHM (hellblau schraffiert). (Quelle: L. Waser, WSL)	9
Abb. 3: Einfluss des Schattenwurfs und des Kontrastes auf die Verteilung der gematchten Punkte (in Blau) – Algorithmus eATE (ERDAS IMAGINE), Bodenauflösung ca. 20 cm, Überlappung 60/30 %. (Quelle: P. Adler, FVA Baden-Württemberg)	11
Abb. 4: Einschneidewinkel des Nadirsichtstrahls zum folgenden Bild als Funktion der Längsüberlappung für ausgewählte Luftbildkamerasysteme: IGI (DigiCam), UltraCam (UC*). Leica Geosystems (DMC) und DLR (MACS). (Quelle: T. Bucher, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)	13
Abb. 5: Einfluss der Brennweite (f) auf die Flughöhe und die Vollständigkeit des DOM quer zur Flugrichtung im Wald bei gleicher Bodenauflösung (Bayer 2017, verändert nach Wiechert & Gruber 2013). Der prozentuale Anteil ohne Höhe repräsentiert die Bereiche mit Verdeckungen bzw. ohne erfolgreiches Matching. Diese nehmen mit steigendem Öffnungswinkel, insbesondere bei kurzen Brennweiten (hier 80 mm im Vergleich zu 210 mm), stark zu.	14
Abb. 6: Abbildungsgeometrie der Stereoauswertung. (Quelle: T. Koukal, BFW)	17
Abb. 7: Beispielhafte Darstellung der Lückenkartierung entlang einer Profillinie (rot) in einem Orthophoto (1), nDOM (2) und der zugrunde liegenden Image-Matching-Punktwolke (3). (Quelle: K. Zielewska-Büttner, FVA Baden-Württemberg)	25
Abb. 8: Einfluss des Sonnenstandes auf Schattenwurf und Oberflächenberechnung aus zwei Befliegungen von 2009 und 2012 (beide 20 cm Bodenauflösung, 60/30 % Überlappung, radiometrische Auflösung 8 und 16 Bit für Jahre wie angegeben). (Quelle: Zielewska-Büttner <i>et al.</i> 2016b).	26
Abb. 9: Kartierte Lückenflächen pro Hektar in Abhängigkeit vom verwendeten Matching-Verfahren basierend auf einem Luftbilddatensatz von 2014, Testfläche bei Pforzheim. (Quelle: Zielewska-Büttner, FVA)	26
Abb. 10: Unterschiede in den Ergebnissen der Lückenerfassung mithilfe von nDOM, die mit verschiedenen Image-Matching-Algorithmen für einen Luftbilddatensatz von 2014 auf einer Testfläche bei Pforzheim erstellt wurden. Farbliche Darstellung in Anlehnung an die Abb. 9. (Quelle: Zielewska-Büttner, FVA)	27
Abb. 11: Einzelbaumsegmentierung mittels Watershed-Algorithmus basierend auf einem nDOM aus Image Matching von Luftbildern aus einer Drohnen-Befliegung über einer Douglasien-Versuchsfläche im Südschwarzwald in 2017. Die gelben Dreiecke markieren die Baumspitzen, während die weissen Segmente das Resultat des Watershed-Algorithmus darstellen. Hintergrund: Orthophoto (links) und nDOM (rechts). (Quelle: S. Ganz, FVA Baden-Württemberg)	28
Abb. 12: Orthophoto swissimage (links), VHM Landesforstinventar Schweiz (Mitte), Landeskarte 1:10'000 mit extrahierten Einzelbäumen swisstopo (rechts). (Quelle: Ginzler und Hobi 2015)	28
Abb. 13: Arbeitsablauf zur Ableitung von forstwirtschaftlich relevanten Vegetationshöhensegmenten. (Quelle: nach Coenradie <i>et al.</i> 2012)	30
Abb. 14: Schematische Darstellung verschiedener Überschirmungs- beziehungsweise Deckungsgrade (DG) (Quelle: AFL 2003).	31
Abb. 15: Arbeitsablauf für die Regionalisierung von Forstinventuren durch Kombination von VHM und terrestrischen Daten (Quelle: nach Stepper <i>et al.</i> 2014).	33
Abb. 16: Kartierung von potenziellen Flächen des Waldzu- oder abgangs für die Forstgrunddaten. (Quelle: Hoffmann 2014)	34

Abb. 17: Analyse von DOM-Profilen. Die Bildpaare stammen aus dem Jahr 2010 (linkes Luftbild) beziehungsweise 2013 (rechtes Luftbild). Die gelb gestrichelte Linie kennzeichnet die Lage der Profile. Die roten und blauen Linien zeigen die Profilverläufe. Von oben nach unten: (a) Gehölzfläche ohne Veränderungen, (b) Ackerland ohne Veränderungen, (c) Gehölzfläche mit Veränderungen (Quelle: WANG <i>et al.</i> 2015).	35
Abb. 18: Wuchsklassen (links) und Baumartengruppen aus Fernerkundungsdaten (rechts). (Quelle: Hoffmann <i>et al.</i> 2017)	36
Abb. 19: RGB-Orthophoto mit umgestürzten Einzelbäumen und abgebrochenen Kronen (oben); überlagert mit fehlenden Bäumen in lila aus der Differenz von DOM 2018 und DOM 2016 (unten). (Quelle: Luftbild und Umweltplanung 2018)	37
Abb. 20: nDOM (links) Waldhöhenstrukturkarte mit Bestandesabgrenzung (rechts). (Quelle: P. Adler, FVA)	38
Abb. 21: Holzvorratskarte mit mittleren Vorräten und Standardfehlern pro Bestand. (Quelle: P. Adler, FVA)	39
Abb. 22: Kartenausschnitt der LFI-Waldmaske sowie die aus dem VHM berechneten Vegetationshöhen. (Quelle: Ginzler und Hobi 2016).	40
Abb. 23: KlimaWIS.NRW-Modul «Forsteinrichtung»: Baumhöhenkarte (nDOM) berechnet aus DGM1L und DOM1L und Höhenprofil (siehe gelbe Linie mit Pfeilsignatur).	40
Abb. 24: Werkzeug zur Baumhöhenmessung (gemessene Fläche ist mit einem gelben Quadrat gekennzeichnet).	41
Abb. 25: Oberflächenmodell (1 m räumliche Auflösung) aus dem von der LWF beauftragten Bildflug (nach dem Sturm Kollé), eingefärbt mit dem zugehörigen CIR-Orthophoto. Deutlich erkennbar ist die geschädigte Waldfläche.	42
Abb. 26: Digitales Oberflächenmodell DOM der Bayerischen Vermessungsverwaltung (vor dem Sturm), eingefärbt mit dem zugehörigen CIR-Orthophoto.	42
Abb. 27: Visualisierung einer Zeitreihe von Vegetationshöhenmodellen.	43
Abb. 28: Aus den Vegetationshöhenmodellen klassifizierte Baumhöhenklassen der Waldzustände 1970 (links), 1991 (Mitte) und 2012 (rechts).	43
Abb. 29: Grünvolumen des Stadtteils Hemannsverder Potsdam. (Quelle: LUP)	44
Abb. 30: NATFLO MAD (linkes Bild) und Klassifikation von Gehölztypen im Pfälzer Wald (rechtes Bild; grün: Laubholz, violett: Nadelholz) auf Basis des MAD. (Quelle: RLP Agrosience)	45
Abb. 31: Das Auerhuhn-Tool: schematischer Ablauf der Struktur Erfassung. (Quelle: S. Ganz, FVA)	46

Formelverzeichnis

Formel 1: Einschneidewinkel	13
Formel 2: NDVI	24

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Walddefinitionen der nationalen Waldinventuren (k.A.=keine Angabe) *Richtwert für die praktische Anwendung (Hauk & Schadauer 2009, BMELV 2011, WSL 2013, FAO 2012).	23
Tab. 2: Begriffsdefinitionen des Auerhuhn-Tools: Vegetationshöhengrenze liegt für alle Strukturen bei zwei Meter.	47

1 Einleitung

In der Forstwirtschaft hat die Informationsgewinnung aus Luftbildern eine lange Tradition. In Deutschland, Österreich und der Schweiz werden Luftbilder seit den 1950er beziehungsweise 1970er Jahren verstärkt für forstliche Anwendungen eingesetzt (HILDEBRANDT 2010; BRASSEL und LISCHKE 2001). Insbesondere in der Forsteinrichtung sind Luftbilder ein unverzichtbares Hilfsmittel, beispielsweise als Arbeitsunterlage beim Waldbegang zur Erfassung und Abgrenzung von Bestandesflächen beziehungsweise zur Anpassung der Waldeinteilung.

In den vergangenen Jahren haben technische Fortschritte im Bereich der Photogrammetrie, wie qualitativ hochwertige und hochaufgelöste digitale Luftbilder, innovative Auswertungsalgorithmen sowie leistungstärkere Hardware, neue Anwendungsgebiete eröffnet und die Ableitung von neuen Produkten aus Luftbilddaten ermöglicht (AFL 2012). Hierzu zählt die Berechnung von hochaufgelösten, digitalen Oberflächenmodellen (DOM) aus Stereo-Luftbildern über automatisierte Verfahren der Bildkorrelation (Image Matching), die dadurch mittlerweile eine Alternative zur flugzeuggestützten Laserscanner-Messung geworden sind.

Luftbildbefliegungen werden flächendeckend durch die Landesvermessungsverwaltungen in einem Wiederholungszyklus von wenigen Jahren durchgeführt. Das stellt einen Vorteil gegenüber der Alternative von Laserscanner-Messungen (LiDAR), die bisher nur einmalig oder seltener erfolgten, als Grundlage für die Gewinnung von Oberflächenmodellen dar. Allerdings haben Laserscanner-Messungen den Vorteil, dass man mit ihnen gleichzeitig auch digitale Geländemodelle (DGM) erstellen kann.

Aus DGM und DOM abgeleitete Vegetationshöhenmodelle (VHM) liefern sehr detaillierte Informationen für eine Vielzahl von Anwendungen im Forst- und Umweltbereich. Sie können somit als wichtiges Hilfsmittel zur Erfassung und Beschreibung von forstlichen und naturschutzrelevanten Kenngrößen eingesetzt werden. Damit ist eine Ableitung räumlich hochaufgelöster Informationen möglich, die flächendeckend für unterschiedliche Befundeinheiten bereitgestellt werden können. Es zeichnen sich zudem neue Ansätze für forstliche Planungsaufgaben und Entscheidungen auf digitaler Basis ab.

Der vorliegende Leitfaden ist insbesondere für Praktiker nützlich, die beispielsweise in Forst- oder Naturschutzverwaltungen, in Forstbetrieben oder Ingenieurbüros mit Fernerkundungsdaten arbeiten. Die notwendigen theoretischen Grundlagen für die Ableitung und Nutzung von luftbildbasierten Oberflächenmodellen im Forst- und Umweltbereich sowie deren Folgeprodukte werden in diesem Leitfaden angesprochen. Die den Leitfaden berührenden Normen und Standards sind in Kapitel 9 aufgeführt.

Die Anforderungen der Forstwirtschaft an die Softwareprodukte sind andere als für Flächen im urbanen und landwirtschaftlichen Raum. Ferner werden zahlreiche Anwendungsbeispiele für Höhenmodelle beschrieben. Das Ziel des Leitfadens ist es, die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen für den Einsatz von luftbildbasierten Oberflächenmodellen aufzuzeigen.

2 Grundlegende Informationen zu Höhenmodellen

Im Zusammenhang mit der Ableitung und Weiterverarbeitung von Höheninformationen können verschiedene Arten von Höhenmodellen unterschieden werden:

- digitales Geländemodell (DGM)
- digitales Oberflächenmodell (DOM)
- normalisiertes Oberflächenmodell (nDOM)
- Vegetationshöhenmodell (VHM)

Das DGM beschreibt die Höhe des Erdbodens (Gelände) ohne Gebäude oder Vegetation, wohingegen das DOM die Höhe der Erdoberfläche einschliesslich aller natürlichen und künstlichen Objekte, wie zum Beispiel Gebäude oder Vegetation, darstellt (Abb. 1). Aus DOM und DGM wird durch Subtraktion ein nDOM abgeleitet, das alle Objekte darstellt, die sich über den Boden erheben. Hierfür muss das DGM im selben Lage- und Höhenbezugssystem vorliegen wie das DOM. Für die Erstellung eines VHM werden aus dem nDOM alle künstlichen Objekte entfernt.

Für die Entfernung der künstlichen Objekte gibt es verschiedene Ansätze:

- Die Objekte können aufgrund ihrer in der Regel geometrischen Formen visuell bestimmt und manuell entfernt werden.
- Die Objekte können durch Bildanalyse der vorliegenden Daten automatisiert bestimmt werden (Kap. 5.1.1).

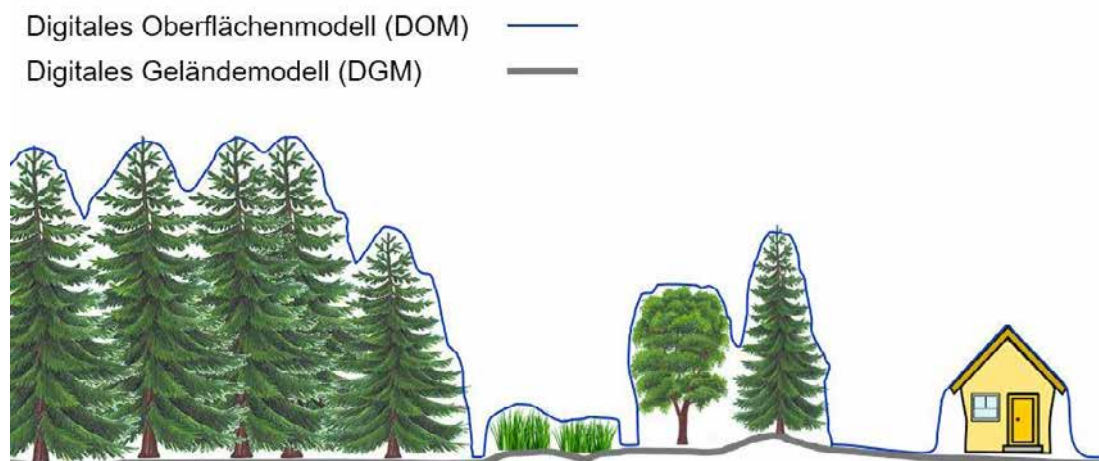


Abb. 1. Veranschaulichung von DGM (grau) und DOM (blau). Quelle: L. Waser, WSL.

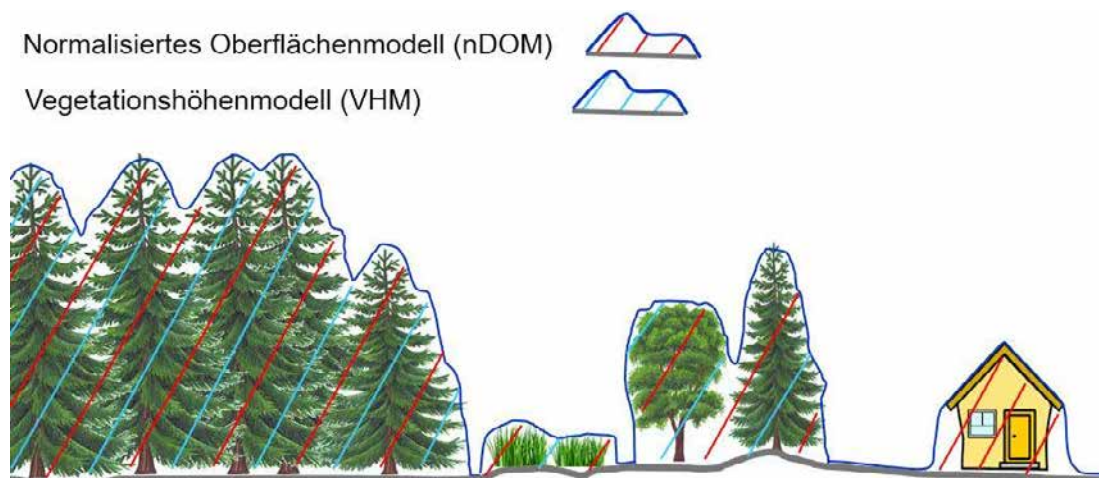


Abb. 2. Veranschaulichung von nDOM (rot schraffiert) und VHM (hellblau schraffiert). Quelle: L. Waser, WSL.

- Es können Hilfsinformationen verwendet werden (z. B. Daten eines Geographischen Informationssystems (GIS) über Siedlungsflächen).
- Der Unterschied zwischen nDOM und VHM ist in Abbildung 2 dargestellt. In Waldbeständen entspricht in der Regel das nDOM dem VHM.

Aus dem VHM können die Vegetationshöhen beziehungsweise Baumhöhen und Über-schirmungsprozente direkt abgeleitet werden. Ausserdem ist eine Charakterisierung der Kronendach-Rauigkeit möglich. Durch die Kombination mit Feldmessungen, insbesondere mit Stichprobenkreisen einer Forstbetriebsinventur, können weitere dendrometrische Kenngrössen modelliert werden, wie zum Beispiel das Holzvolumen oder die Grundfläche (STRAUB *et al.* 2013).

Vegetationshöhenmodelle sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Unterstützung von Land-nutzungsklassifizierungen, insbesondere zur Trennung von Wald- und Nichtwaldflächen. Ferner können Vegetationshöhenmodelle für die Erfassung und Bewertung von Wald-Lebensraumtypen und potenziellen Habitaten unterstützend eingesetzt werden. Hierzu werden in Kapitel 5 Verfahren und in Kapitel 5.4 aktuelle Praxisbeispiele beschrieben.

Digitale Geländemodelle können von den Landesvermessungsverwaltungen bezogen werden. In einem Grossteil der deutschen Bundesländer, in Österreich und der Schweiz sind DGM mit 1 m Bodenauflösung verfügbar, die aus Laserscanner-Befliegungen stammen. Die Vermessungsverwaltungen stellen in den Dokumentationen beziehungsweise Metadaten Angaben zur Höhengenaugigkeit der Geländemodelle zur Verfügung.

Aktuelle Listen der Vermessungsämter in Deutschland, Österreich und der Schweiz sind unter folgenden Links zu finden:

Deutschland:

<https://upd.adv-online.de/icc/extdeu/broker.jsp?uMen=35270061-7527-a8fe-ebc4-f19f08a07b51>

Österreich:

http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,1606562&_dad=portal&_schema=PORTAL

Schweiz:

<https://www.cadastre.ch/de/about/contact/cantons.html>

3 Eingangsdaten für die Ableitung von Oberflächenmodellen

Die Qualität der Vegetationshöhenmodelle (VHM) oder digitalen Oberflächenmodelle (DOM) hängt von der Aktualität und Qualität der Eingangsdaten ab. Hierzu zählen die digitalen Luftbilder und die Geländemodelle. Aus den forstlichen Fragestellungen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Eigenschaften der Luftbilder.

3.1 Digitale Luftbilder

Die Ableitung von Oberflächenmodellen über Image Matching basiert auf digitalen Stereo-Luftbildern (siehe Kap. 4). Kantenscharfe Bilder, gut ausgeleuchtete Objekte usw. sind Basis eines detailreichen und genauen DOM. Die Luftbilder können aus aktuellen Befliegungen oder aus Luftbildarchiven stammen, wie zum Beispiel denen der Landesvermessungsinstitutionen.

Folgende Daten zum Bildflug sind für die Ableitung von Höheninformationen erforderlich:

- Äussere Orientierung mit Lage- und Höhenbezugssystem
- Kameraprotokoll

Zur umfassenden Beurteilung der Eignung der Bilder sowie der Höhenmodelle werden folgende Informationen benötigt:

- Längs- und Querüberlappung
- Datum und Uhrzeit/Sonnenstand
- Kamerateyp, Brennweite
- Orientierungsgenauigkeit
- mittlere Bodenauflösung

Ein Überblick zu den Anforderungen an die Bildflüge findet sich in AFL (2012).

3.1.1 Allgemeine Rahmenbedingungen von Bildflügen

3.1.1.1 Aufnahmezeitpunkt

Die Luftbildaufnahmen sollten im Tages- wie auch Jahresverlauf zu möglichst hohen Sonnenständen erfolgen. Dies verringert stark beschattete Bereiche und verbessert den Kontrast in den Bildern. Abbildung 3 zeigt den Einfluss von Schattenbereichen auf die Oberflächenberechnung. Auftreten von Schnee oder Hochwasser kann die Qualität der Oberflächenmodelle negativ beeinflussen.

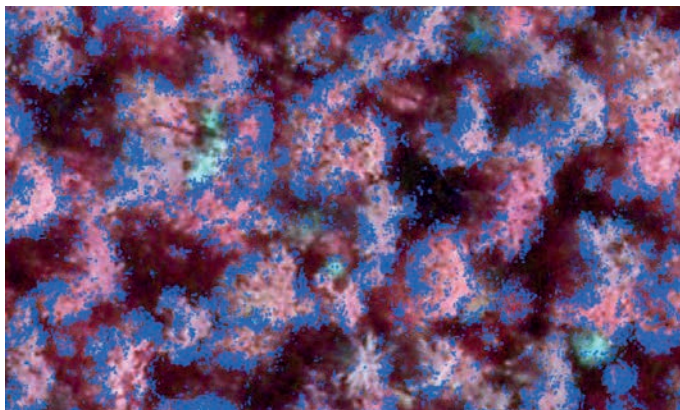


Abb. 3. Einfluss des Schattenwurfs und des Kontrastes auf die Verteilung der gematchten Punkte (in Blau) – Algorithmus eATE (ERDAS IMAGINE), Bodenauflösung etwa 20 cm, Überlappung 60/30 %. Quelle: P. Adler, FVA Baden-Württemberg.

Fehlende Belaubung erschwert die Erkennbarkeit und Abgrenzung von Baumkronen und kann zur Generierung von Höhenpunkten auf der Geländeoberfläche und im Innenbereich der Baumkronen führen. Deshalb sind bei der Auswertung von Laubholzbereichen Luftbilder erforderlich, die während der Vegetationszeit aufgenommen wurden. Ein optimaler Zeitpunkt für die Erfassung von Laubbäumen ist im Frühsommer oder kurz nach der Laubverfärbung im Herbst, da sie in den Bildern dann kontrastreicher dargestellt werden. Weitere phänologische Besonderheiten, wie zum Beispiel der Blüheffekt bei der Kiefer, können die Qualität der Oberflächenmodelle negativ beeinflussen.

3.1.1.2 Atmosphärische und witterungsbedingte Einflüsse

Ungleichmässige Beleuchtungsverhältnisse durch Wolken, Wolkenschatten oder Dunst beeinträchtigen die Qualität der Luftbildaufnahmen und damit auch des abgeleiteten Oberflächenmodells. Dies gilt auch für bodennahen Wind. Durch die Bewegung werden Vegetationsoberflächen in den sich überlappenden Luftbildern unterschiedlich abgebildet. Zusätzlich führt der Wind zu Bewegungsunschärfe der Objekte. Es kommt zu Fehlern in den abgeleiteten Höhenmodellen.

3.1.2 Eigenschaften digitaler Luftbilder

Bayer (2017) hat in seiner Dissertation aufgezeigt, dass für optimale DOM sowohl spezielle Eigenschaften des Waldes als auch die Eigenschaften der jeweiligen Kamera und des Bildkorrelationsverfahrens (Image Matching) berücksichtigt werden müssen. Für Bildflüge über Waldgebieten ergeben sich daraus Empfehlungen zur Wahl der Parameter hinsichtlich der Kamera und der Bildflugplanung.

3.1.2.1 Radiometrie

Es können Luftbilder mit einer radiometrischen Auflösung von 8 oder 16 Bit verwendet werden. Vorzuziehen sind Bilder mit 16 Bit, da dort in Schattenbereichen, zum Beispiel in Bestandeslücken oder an hohen Bestandesrändern, Konturen deutlicher und detailreicher abgebildet werden. Die Bilder sollten in Waldgebieten keine überstrahlten oder stark unterbelichteten Bereiche aufweisen. Die Verwendung von komprimierten Daten kann zu Problemen bei der Ableitung von Höhenmodellen führen.

3.1.2.2 Längs- und Querüberdeckung

Die Längsüberdeckung soll mindestens 60 Prozent, besser noch 80 Prozent betragen, die Querüberdeckung zwischen benachbarten Flugstreifen mindestens 40 Prozent. Es lassen sich zwar auch Bilder mit geringeren Überdeckungswerten verarbeiten, jedoch kommt es zu qualitativen Einbussen bei den Matching-Ergebnissen. Die benötigte Überlappung ist abhängig von dem jeweiligen Kameratyp. Bei kurzen Brennweiten wird für eine Erfassung der Bestandesstrukturen (z. B. Lücken) eine höhere Überlappung benötigt.

3.1.2.3 Blickwinkel

Grundsätzlich werden grosse Schnittwinkel in der Photogrammetrie als positiv für die Höhengenaugigkeit der 3D-Objektpunkte angesehen. Auf der anderen Seite reduziert sich bei grossen Schnittwinkeln beziehungsweise stark unterschiedlichen Perspektiven auf ein Objekt in der Regel deren Ähnlichkeit, was die Bildzuordnung erschwert. Insbesondere bei komplexen Oberflächen beziehungsweise Objekten, wie sie Bäume (Blätter, Äste, wechselnder Untergrund und Schatten) darstellen, führen starke Änderungen in der Perspektive zur Abnahme der Ähnlichkeit und zu Schwierigkeiten bei der Bildzuordnung (HAALA und ROTHERMEL 2012). Weiterhin verursacht die Kombination aus starkem, lokalem Relief und höheren Blickwinkeln (grossen Öffnungswinkeln der Kamera) eine Zunahme von Verdeckungen im Bild, sowohl entlang wie auch quer zur Flugrichtung. Bei schmalen Öffnungswinkeln können insbesondere Lücken und Schneisen besser erfasst werden.

Untersuchungen von BAYER (2017) zeigen, dass im Wald bis zu einem Einschneidewinkel von etwa $\leq 10^\circ$ in Flugrichtung zwischen zwei benachbarten Bildern die Bildzuordnung mit Semi-Global Matching in der Regel gut funktioniert. Die besten Ergebnisse, insbesondere hinsichtlich der Vollständigkeit, wurden in Vergleichstests bei Winkeln um

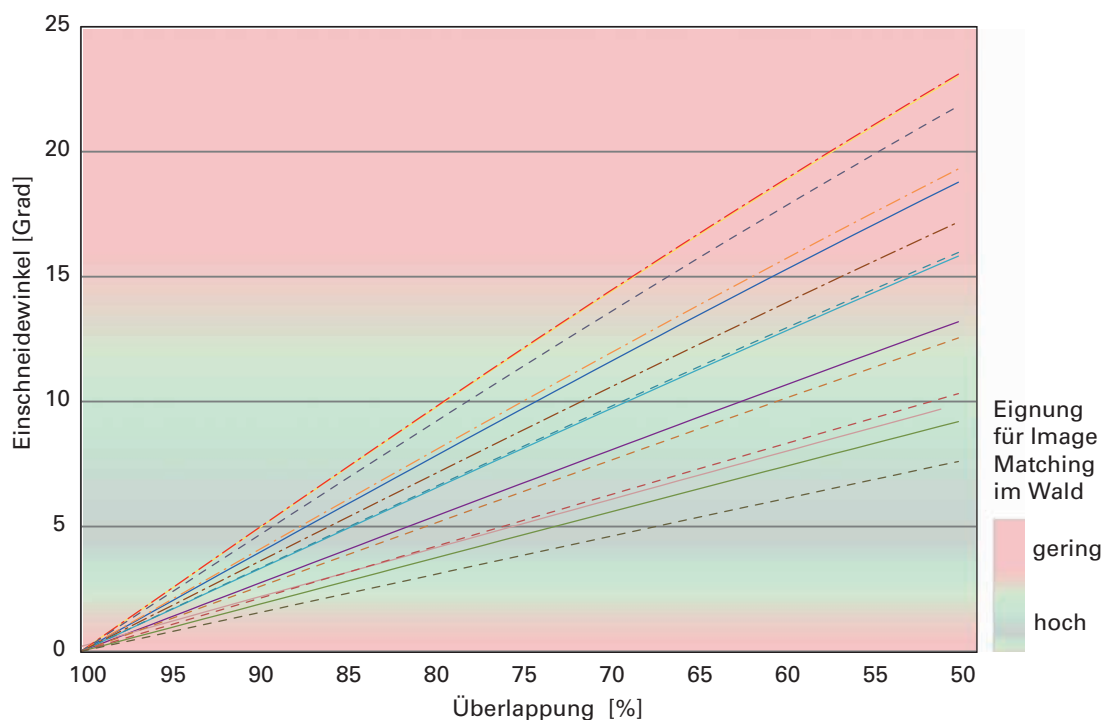
5° erzielt. Hier wirkt sich die bei geringen Blickwinkelunterschieden relativ ähnliche Perspektive beziehungsweise Abbildung positiv aus. Oberhalb von etwa 12 bis 15° nimmt insbesondere für die diskontinuierliche Waldoberfläche die Dichte der gematchten Punkte (Matchingdichte) stark ab. Der Effekt der grösseren Vollständigkeit der Bildzuordnung bei geringen Einschneidewinkeln überwiegt hierbei die Nachteile einer geringeren Höhengenaugigkeit aufgrund des kleinen Schnittwinkels. Die Beziehung zwischen Einschneidewinkel und Überlappung ist für ausgewählte Kameras in Abbildung 4 dargestellt. Diese kann wahlweise über eine der beiden nachfolgenden Formeln ausgedrückt werden.

Formel 1: Einschneidewinkel

$$\tan \alpha = \frac{\text{Abstand zwischen den Bildmitten am Boden (L 1)}}{\text{Flughöhe (h)}}$$

$$\tan \alpha = \frac{\text{Abstand zwischen den Bildmitten am Boden (L 2)}}{\text{Brennweite (f)}}$$

Aus Abbildung 4 wird ersichtlich, dass Schnittwinkel von $\leq 10^\circ$ bei den meisten Kamerasystemen erst ab 80 Prozent Längsüberlappung erreicht werden. Für optimale Schnittbedingungen um 5° sind noch höhere Überlappungen erforderlich, die aufgrund der nötigen schnellen Bildwiederholrate oft nur in grossen Flughöhen erzielt werden können. Insbesondere bei 60 Prozent Längsüberlappung sollte möglichst eine lange Brennweite verwendet werden.



Kamerasysteme mit Brennweite (f in mm)

MACS-HALE f51	DMC2_230 f92	DigiCam_150 f50
MACS-RT f70	DMC2_250 f112	DigiCam_150 f70
UC_Eagle f80	DMC3 f92	DigiCam_150 f90
UC_Eagle f100		DigiCam_150 f110
UC_Eagle f120		DigiCam_150 f150
UC_Eagle f210		

Abb. 4. Einschneidewinkel des Nadirsichtstrahls zum folgenden Bild als Funktion der Längsüberlappung für ausgewählte Luftbildkamerasysteme: IGI (DigiCam), UltraCam (UC*), Leica Geosystems (DMC) und DLR (MACS). (Quelle: T. Bucher, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt).

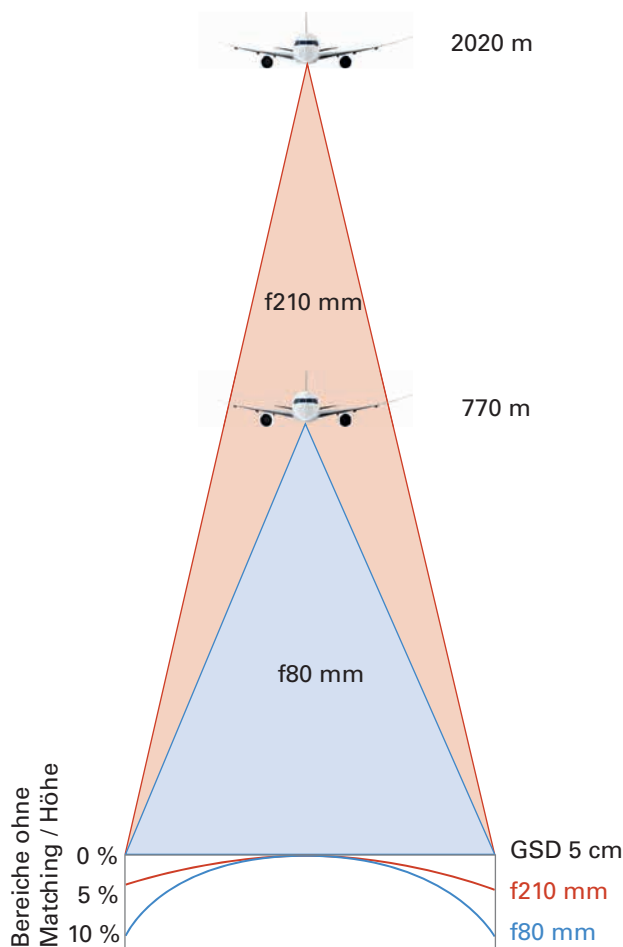


Abb. 5. Einfluss der Brennweite (f) auf die Flughöhe und die Vollständigkeit des DOM quer zur Flugrichtung im Wald bei gleicher Bodenauflösung (BAYER 2017; verändert nach WIECHERT und GRUBER 2013). Der prozentuale Anteil ohne Höhe repräsentiert die Bereiche mit Verdeckungen bzw. ohne erfolgreiches Matching. Diese nehmen mit steigendem Öffnungswinkel, insbesondere bei kurzen Brennweiten (hier 80 mm im Vergleich zu 210 mm), stark zu.

Auch quer zur Flugrichtung ist ein geringer Öffnungswinkel von Vorteil. Dies hat ein Vergleich der Matchingdichte in Abhängigkeit von der Lage im Bildstreifen (quer zur Flugrichtung) zweier UltraCam-Befliegungen verdeutlicht (BAYER 2017). Die Zahl der nicht zugeordneten Bildpunkte nimmt zum Rand deutlich zu, insbesondere bei kürzeren Brennweiten beziehungsweise grösseren Öffnungswinkeln (Abb. 5).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für Befliegungen, die der Erstellung von Oberflächenmodellen im Wald dienen, tendenziell längere Brennweiten und geringere Schnittwinkel (geringere Basis-Höhen-Verhältnisse) empfohlen werden. Bei langen Brennweiten verringert sich der Kippeffekt von hohen Objekten (Bäumen) zum Bildrand. Bei sehr kurzen Brennweiten (Weitwinkelobjektive) entspricht der Kippeffekt am Rand der Objekthöhe.

Wenn bei Luftbild-Befliegungen die Überlappung in Flugrichtung von 60 Prozent auf 80 Prozent erhöht wird, entstehen keine wesentlichen Mehrkosten bei der Befliegung. Allerdings erhöhen sich die Bildanzahl und somit der Speicherbedarf sowie der Aufwand und die Kosten bei der Verarbeitung der Daten.

Durch zusätzliche Schrägaufnahmen lässt sich die geometrische Abbildung der Bestandesoberflächen verbessern. Hierfür können unter anderem Oblique-Kameras eingesetzt werden.

3.1.2.4 Auflösung

Untersuchungen zur Qualität der Bildzuordnung und zur Vollständigkeit der DOM in Abhängigkeit von der Bildauflösung haben gezeigt, dass die Qualität der Oberflächenmodelle im Wald auch von der Bildauflösung abhängt. Ein Optimum wurde von BAYER (2017) bei etwa 15 cm bis 20 cm festgestellt. Dies liegt zum einen an der stark zunehmenden Komplexität der Bildinformation mit zunehmender räumlicher Auflösung. Ab einer höheren Auflösung als ca. 10 cm werden Blätter und Äste zunehmend nicht mehr als einheitlich generalisiertes, meist grünes Baumobjekt, sondern als Einzelobjekte abgebildet. Je nach Ausrichtung der Blätter, der Perspektive und des Untergrunds können diese, insbesondere unter unterschiedlichen Blickwinkeln, oft nur schwer eindeutig identifiziert und zugeordnet werden. Hinzu kommt in diesen sehr hohen Auflösungsbereichen der verstärkte Einfluss von Bewegung durch Wind, der die Lage der Blätter und Äste verändert. Dies behindert sowohl die korrekte Zuordnung wie auch die korrekte Höhen- und Lagebestimmung. Bei gröberen Auflösungen im Bereich von 15 cm bis 20 cm sind diese Effekte in Relation zur Pixelgrösse weniger stark ausgeprägt, was eine zuverlässigere Bildzuordnung bei meist immer noch ausreichender Auflösung im DOM ermöglicht.

Die Bodenauflösung der verwendeten Luftbilder bestimmt die Bodenauflösung des daraus berechneten DOM. Zur Vermeidung von Artefakten sollte die Auflösung des DOM in Abhängigkeit von der Längs- und Querüberlappung um einen Faktor bis zu 5 niedriger sein als die des Luftbildes. Das heisst, aus Luftbildern mit 20 cm Bodenauflösung lassen sich bei geringer Überlappung Oberflächenmodelle mit einer Bodenauflösung von 1 m ableiten, die für viele forstliche Auswertungen gut geeignet sind. Bei Luftbildbefliegungen mit höheren Bildüberlappungen (> 80 %) sinkt dieser Faktor bis auf 1 ab.

Neben den oben genannten Parametern beeinflussen alle Kameraeinstellungen, welche die Tiefenschärfe der Bilder verändern, die Qualität des Matchings und damit auch die Qualität des Oberflächenmodells. Grundsätzlich sollten Luftbilder verwendet werden, die mit Kameras mit stabiler geometrischer Kalibrierung aufgenommen wurden.

3.1.3 Orientierungsdaten

Für eine stereoskopische Auswertung werden Daten zur inneren und äusseren Orientierung der Luftbilder benötigt. Die innere Orientierung beschreibt die Geometrie der Kamera (Kap. 4.1.1). Die äussere Orientierung gibt die Lage der Bildebene zum Aufnahmezeitpunkt an (Kap. 4.1.2). Üblicherweise werden die Orientierungsdaten passend zu den Stereoluftbildern mitgeliefert.

Genaue Neigungs- und Positionsdaten aus einem differenziellen globalen Navigationssatellitensystem (DGNSS) – kombiniert mit einem Inertialen Navigationssystem (INS) – sind empfehlenswert. Sie werden während des Bildfluges für die einzelnen Luftbilder aufgezeichnet. Dies erleichtert die Bildorientierung. Diese Daten sind Voraussetzung für präzise Orientierungsergebnisse und bieten letztlich die notwendige Basis für die Ableitung hochwertiger Höhenmodelle.

4 Automatisierte Ableitung von Höheninformationen aus Luftbildern

Die Ableitung von Höheninformationen aus digitalen Luftbildern bedarf verschiedener Arbeitsschritte. Liegen die Bilddaten bereits orientiert vor, können verschiedene Softwareprodukte mit unterschiedlichen Algorithmen für die Ableitung der Höheninformationen verwendet werden. Andernfalls muss eine Bildorientierung (Kap. 4.1) durchgeführt werden.

Luftbild-Befliegungen werden üblicherweise so durchgeführt, dass sich benachbarte Bilder in Flugrichtung mit mindestens 60 Prozent überlappen, damit jeder Geländeabschnitt mit mindestens zwei Bildern abgedeckt ist. Je höher dabei die Überlappung ist, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass Objekte auf der Erdoberfläche in mindestens zwei Bildern sichtbar sind. Sind die Orientierungsdaten, bestehend aus innerer und äusserer Orientierung, bekannt, so lassen sich Bilder stereoskopisch auswerten, um dadurch die Koordinaten (Lage und Höhe) von korrespondierenden Bildpunkten im Überlappungsbereich zu ermitteln.

Für die Bestimmung der Koordinaten eines Punktes muss dieser in beiden Bildern des Stereo-Bildpaars identifiziert werden. Man spricht von korrespondierenden Bildpunkten. Das Auffinden korrespondierender Punkte kann durch sogenannte Image-Matching-Verfahren automatisiert werden. Die Bestimmung der Koordinaten erfolgt durch geometrische Verschneidung der Abbildungsstrahlen (Abb. 6). Die Summe aller auf diese Weise bestimmten Punkte bildet eine 3D-Punktwolke.

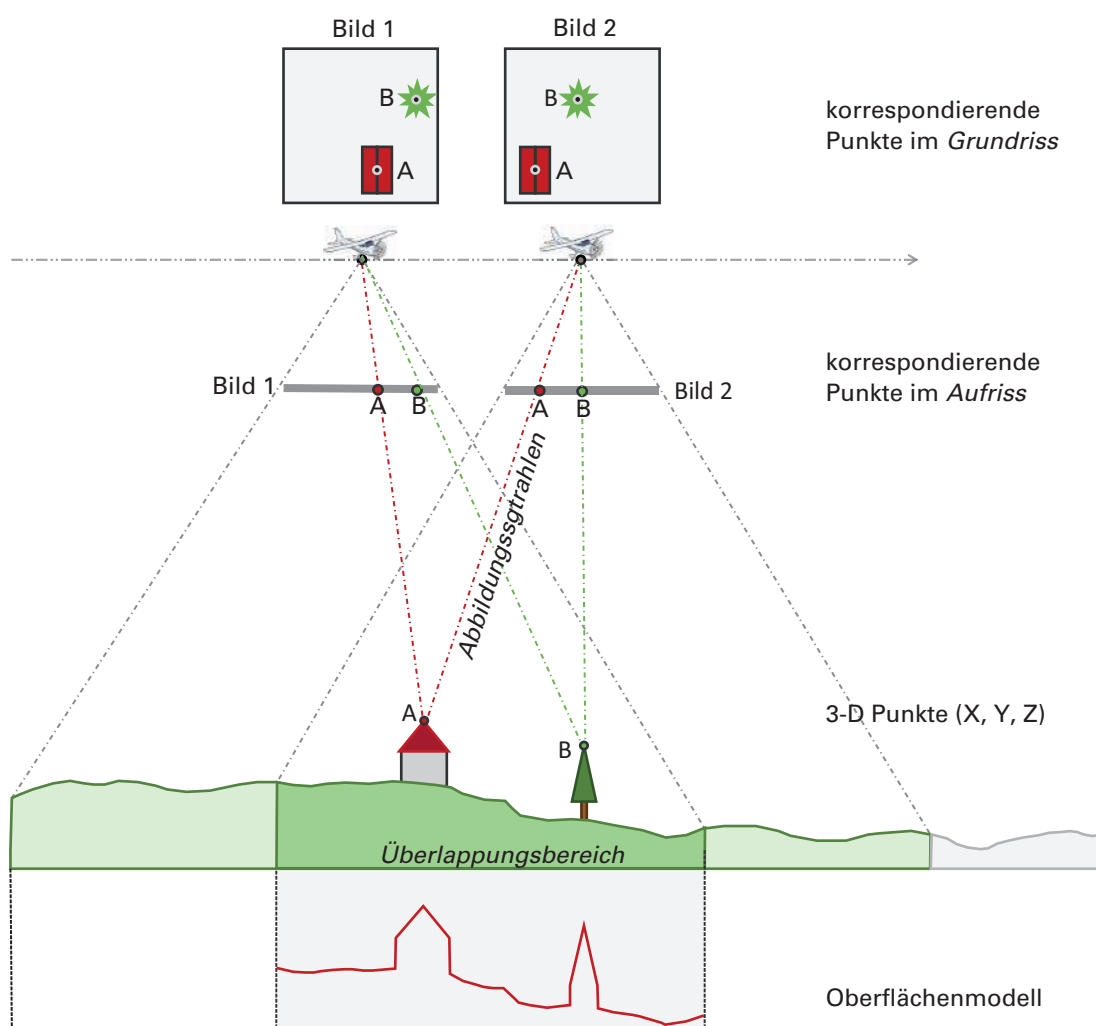


Abb. 6. Abbildungsgeometrie der Stereoauswertung. Quelle: T. Koukal, BFW.

4.1 Bildorientierung

Unter Bildorientierung wird die Transformation von Bildkoordinaten in ein übergeordnetes Koordinatensystem (z. B. Landeskoordinatensystem) verstanden. Sie ist eine wesentliche Voraussetzung für die lagegenaue Auswertung, die Verbindung mit anderen Geodaten sowie die Herstellung von Orthophotos und Höhenmodellen. Die Bildorientierung gliedert sich in die innere und die äussere Orientierung.

Die Ausführungen zur Bildorientierung wurden dem Leitfaden der Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpretation zum digitalen Luftbild (AFL 2012) entnommen.

4.1.1 Innere Orientierung

Die innere Orientierung beschreibt die Geometrie der Kamera durch die Parameter Brennweite, Koordinaten des Bildhauptpunktes, Linsenverzerrung und Bildgrösse, welche mithilfe von Kalibrierungsverfahren bestimmt werden. Die Grösse und Lage des Bildes wird bei digitalisierten, analogen Bildern durch die Koordinaten der Rahmenmarken beschrieben. Bei Matrixkameras wird die Bildausdehnung durch die Sensorgrösse definiert (Pixelgrösse, Pixelanzahl in x- und y-Richtung). Bei Zeilenkameras ist die Bildausdehnung ebenfalls durch die Sensorgrösse definiert. Hier besteht der Sensor allerdings nur aus einer Pixelzeile, zum Beispiel 20000 Pixel in einer Zeile bei der ADS100. Erst durch das Aneinanderfügen einzelner Bildzeilen entsteht der Bildstreifen. Die Parameter der inneren Orientierung kann man dem Kalibrierungsprotokoll entnehmen. Dieses muss von der Befliegungsfirma angefordert werden.

4.1.2 Äussere Orientierung

Die äussere Orientierung gibt die Lage der Bildebene zum Aufnahmezeitpunkt an, die definiert wird durch die X-, Y- und Z-Koordinaten des Projektionszentrums sowie die drei Drehwinkel ω , φ und κ . Diese Werte können durch DGNSS- und INS-Aufzeichnungen oder durch Aerotriangulation bestimmt werden. In Abhängigkeit von der Genauigkeit der DGNSS-/INS-Daten und der Flughöhe können Objekte bereits mit einer Lagegenauigkeit von 0,5 m bis 5 m gemessen werden.

Da diese Genauigkeiten in der Regel für Image-Matching-Methoden, insbesondere das Semi-Global Matching (SGM), nicht ausreichend sind, ist es von Vorteil, eine Aerotriangulation durchzuführen. Die benötigten Passpunkte können zum Beispiel von den Landesvermessungsämtern bezogen werden. Sollten die vorhandenen Passpunkte nicht ausreichen, können diese entweder selbst (z. B. aus einem bereits vorhandenen, gut orientierten Bildflug) oder durch die Befliegungsfirma erhoben werden.

4.1.3 Aerotriangulation

Die Aerotriangulation ist eine Methode, mit der in einem Schritt simultan die äussere Orientierung auch grosser Bildblöcke bestimmt wird. Als Eingangsparameter dienen Verknüpfungspunkte, Passpunkte und näherungsweise Projektionszentren.

Die Genauigkeit wird im Wesentlichen beeinflusst von:

- der Bodenauflösung bzw. dem Bildmassstab
- der Art und Genauigkeit der Passpunkte
- der Anzahl der Passpunkte
- der Verteilung der Passpunkte im Bildblock
- der Bildqualität (z. B. Bildkontrast, Bildrauschen)

Passpunkte sollten möglichst an den Blockrändern und in den Blockecken gesetzt werden.

Es ist empfehlenswert, die Aerotriangulation von der beauftragten Bildflugfirma durchführen zu lassen oder von der Vermessungsverwaltung zu beziehen.

Die absolute Genauigkeit einer Aerotriangulation kann durch Kontrollmessungen von bekannten Punkten in einem orientierten Bildblock ermittelt werden (Kontrollpunkte mit bekannten Koordinaten). Diese Punkte dürfen vorher nicht in die Ausgleichungsrechnung mit eingegangen sein.

Bei der Auswertung von Zeitreihen ist es wichtig, die Lageverschiebungen zwischen den Bildjahrgängen möglichst gering zu halten. Hierfür bietet sich an, die Passpunkte aus einem bereits orientierten Vergleichsbildflug zu übertragen.

Die vorangegangenen Ausführungen gelten grundsätzlich auch für Bilddaten aus Befliegungen mit unbemannten Luftfahrzeugen (UAV). Hierbei sollte in jedem Fall eine Aerotriangulation als Grundlage für das Image Matching durchgeführt werden. Es wird empfohlen, dass mit einer möglichst hohen Längs- und Querüberlappung (z. B. >90 % Längsüberlappung) geflogen wird.

4.2 Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen mittels Image Matching

Unter Image Matching versteht man das automatisierte Auffinden korrespondierender Punkte in überlappenden Bildern. Dies ist Voraussetzung für das Ableiten von Höheninformationen mithilfe photogrammetrischer Methoden. Es existieren verschiedene Image-Matching-Verfahren und entsprechende Softwareprodukte. Aktuell wird vorwiegend das SGM von HIRSCHMÜLLER (2005, 2008) angewendet. Weiterführende Informationen sind auch in WHITE *et al.* (2013) zu finden. Grundsätzlich sollte beachtet werden, dass für Waldoberflächen andere Anforderungen gestellt werden als im urbanen oder landwirtschaftlich genutzten Raum.

Die Auswahl des Image-Matching-Verfahrens richtet sich nach folgenden Kriterien:

- Datenqualität
- Stabilität und Zuverlässigkeit des Verfahrens
- Integrierbarkeit in vorhandene Abläufe
- Rechenzeit
- Kosten
- Support
- Bedienerfreundlichkeit
- vorhandene Erfahrungen

Verschiedene Softwareprodukte ermöglichen es dem Benutzer, durch Anpassung unterschiedlicher Einstellungen das DOM zu optimieren. Je nach gewählten Einstellungen können sich die Ergebnisse in Detailliertheit und Oberflächenstruktur unterscheiden oder auch zu unvollständigen oder fehlerhaften Höhenmessungen führen.

Image-Matching-Verfahren liefern 3D-Punktwolken. Daraus wird mit entsprechenden Filter- und Interpolationsmethoden ein regelmässiges 3D-Raster abgeleitet. Dieses stellt ein digitales Oberflächenmodell (DOM) dar. Dabei muss auf den verwendeten Algorithmus geachtet werden. Bei Standardverfahren kann es vorkommen, dass hohe, alleinstehende Punkte als Fehler herausgefiltert werden, bei denen es sich aber überwiegend um Baumspitzen handelt. Dadurch wird die Baumhöhe reduziert.

Da optische Stereoverfahren auf die Abbildung der Oberfläche beschränkt sind, können darin nur sichtbare Bildinhalte abgebildet werden.

4.3 Qualitätsparameter und Qualitätsbeurteilung

Nach der Erstellung eines DOM muss seine Qualität und Verwendbarkeit überprüft werden. Fehler in einem DOM können zum Beispiel durch mangelhafte Orientierungsdaten, Bildfehler oder Witterungseinflüsse entstehen. Mögliche Fehler im DOM sind Lageversatz, Höhenfehler, No-Data-Bereiche und Artefakte.

Das Vorgehen bei der Qualitätskontrolle hängt von der Gebietsgrösse und der Aufgabenstellung ab. Folgende Daten können dafür verwendet werden:

- Berechnungsprotokoll
- Höhenhistogramm
- 3D-Punktwolke
- True Orthophoto/DOM
- Andere Höheninformationen als Referenzdaten (z. B. LiDAR-Daten, Baumhöhenmessungen)
- (Grafische) Ableitungen (z. B. No-Data, Punktdichte)

Grundsätzlich können diese Daten visuell kontrolliert oder quantitativ bewertet werden. Dabei muss beachtet werden, welche Modelle (DOM oder nDOM) überprüft werden.

4.3.1 Visuelle Beurteilung

Unter visueller Beurteilung werden Verfahren verstanden, die schnell und mit Standardwerkzeugen visuell durchgeführt werden können.

Plausibilität und Fehlermeldungen aus den Ergebnissen der Bildorientierung zeigen mögliche problematische Bereiche. Hier ist die Anzahl der Verknüpfungspunkte zwischen den Bildern und eventuell die Verteilung der Passpunkte besonders wichtig.

Ein weiteres Mittel zur Qualitätsbeurteilung ist eine grafische Darstellung der Anzahl der verwendeten Modelle je gematchtem Punkt. Mögliche Fehler lassen sich gut erkennen durch Artefakte und Verzerrungen in einem farblich codierten Schummerungsbild (shaded relief) des DOM oder nDOM sowie in einem Orthophoto, das aus dem DOM berechnet wurde. Die Darstellung von No-Data-Bereichen gibt einen Hinweis auf deren Verteilung und die Vollständigkeit des DOM. Zusätzlich kann durch den visuellen Vergleich der Oberflächenmodelle zu Orthophotos die Plausibilität überprüft werden.

Zur Beurteilung des Höhenrahmens können Höhenhistogramme verwendet werden. Hier sieht man gut die Verteilung der Höhenwerte und kann Ausreisser identifizieren. Durch visuelle Überlagerung des DOM mit einem anderen DOM oder einem DGM können grobe Höhenversätze einfach erkannt werden. Hierzu bieten sich offene Flächen wie zum Beispiel Verkehrsflächen und Sportplätze an. Grosse Höhenunterschiede in diesen Bereichen weisen auf Probleme in der absoluten Höhengenaugkeit hin, welche aus einer fehlerhaften Bildorientierung stammen.

In kleineren Gebieten sowie für Stichproben und Problembereiche kann die Darstellung der 3D-Punktwolke für genauere visuelle Überprüfung hilfreich sein.

4.3.2 Quantitative Beurteilung

Die Qualität eines digitalen Oberflächenmodells kann anhand folgender Kriterien beurteilt werden:

1. Einhaltung des zu erwartenden Höhenrahmens
2. Vollständigkeit der Gebietsabdeckung (Vorkommen von No-Data-Bereichen)
3. Summarische Kennwerte der Höhenverteilung (Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum)
4. Punktdichte und Punktverteilung: Mittlerer Punktabstand, Dichtekarten und Voronoi-Diagramme
5. Verhältnis von gematchten zu interpolierten Punkten
6. Lage- und Höhenvergleich mit einem vorhandenen Oberflächenmodell als Referenz oder anhand markanter Objekte aus vorhandenen terrestrischen Daten
7. Stereoskopische Punktmessungen, gegebenenfalls nach Stichprobenkonzept, in den verwendeten Luftbildern
8. Vergleich von Höhenmessungen in benachbarten Stereomodellen in verschiedenen Flugstreifen an definierten Objekten (Kap. 4.1.3)
9. Die Kennwerte können für das gesamte Oberflächenmodell oder spezifisch für bestimmte Objekttypen, Schichten oder Bereiche überprüft werden

4.4 Metadaten

Die Berechnung von Oberflächenmodellen sollte durch folgende Metadaten dokumentiert werden:

Daten des Bildfluges

- Befliegungsdatum mit Uhrzeiten
- Kamera mit Kalibrierungsprotokoll
- Längs- und Querüberlappung
- Flugunternehmen
- Bodenauflösung des Bildfluges
- Äussere Orientierung, deren Qualität und Berechnungsverfahren
- Lage- und Höhenbezugssystem
- Footprints der Luftbilder

Daten der Oberflächenmodellberechnung

- Matching-Software mit Versionsnummer und Einstellparametern
- Lage- und Höhenbezugssystem
- Bei Rasterdaten: Auflösung des DOM
- Bei nDOM-Ableitung: Berechnungsalgorithmus inklusive verwendetem Geländemodell, Filterung und Interpolation
- Institution, Bearbeiter, Erstellungsdatum, Eigentums- und Nutzungsrechte

Sofern eine Veröffentlichungspflicht gemäss der EU-Richtlinie INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) besteht, sind Art, Umfang und Struktur der Metadaten entsprechend anzupassen.

5 Forstliche Anwendungen von Oberflächenmodellen

Aus Oberflächenmodellen können wichtige Informationen für forstliche Anwendungen zur Verfügung gestellt werden. Einige forstliche Kenngrößen können direkt aus den Oberflächenmodellen abgeleitet werden. Andere können indirekt durch Bildung von statistischen Modellen mittels Verknüpfung von Oberflächenmodellen und Stichprobeninformationen geschätzt werden. Zusätzlich eignen sich auch Oberflächenmodelle für Monitoringaufgaben und Zeitreihenanalysen.

5.1 Ableitung von forstlichen Kenngrößen

5.1.1 Unterscheidung Wald/Nichtwald

Die Ausweisung und Darstellung von Waldflächen und somit die Abgrenzung zwischen Wald und Nichtwald ist eine Herausforderung. Beim Begriff «Wald» handelt es sich um einen vielfältig verwendeten, zusammenfassenden Oberbegriff, der als Komposit verschiedener, auch baumfreie Formen der Landbedeckung, wie zum Beispiel Freiflächen, Wildwiesen, Verkehrswege, unter einem Funktions- und Nutzungsbegriff oder im Sinne einer juristischen Definition beinhaltet. Demgegenüber gibt es auch baumbestandene Landschaftsformen, die nicht als Wald definiert beziehungsweise wahrgenommen werden (z.B. Feldgehölze, Weihnachtsbaum- und Kurzumtriebsplantagen). Auch der räumliche Betrachtungsmassstab spielt bei der Ausweisung von Waldflächen eine Rolle. Auf lokalem Massstab kommen Fragen der konkreten Grenzziehung hinzu: Verläuft die Grenze am Stammfuss oder am Kronenrand der Bäume? Zählen freistehende Bäume im vorgelagerten Randbereich eines homogen dichten Baumbestandes (z.B. über Kronenschluss definiert) noch zum Wald?

Auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene existieren aus forstlich-juristischer Sicht unterschiedliche Walddefinitionen, die in entsprechenden Wald- oder Forstgesetzen der Länder festgelegt sind. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl von Definitionen bei Organisationen anderer Ausrichtungen, wie zum Beispiel dem Umwelt- und Ressourcenschutz, der Ernährungssicherung oder der Erfassung von topographischen Geobasisdaten. Zu den wichtigsten quantitativen Merkmalen von Waldflächen zählen Mindestgrösse, Mindestbreite, Baumhöhe, Mindestbestockungsgrad und Bestockungsdauer. Als Beispiel sind die Walddefinitionen der nationalen Waldinventuren Österreichs, Deutschlands und der Schweiz sowie der Welternährungsorganisation (FAO) aufgeführt.

Eine Ableitung von Wald aus Fernerkundungsdaten nach den oben genannten Definitionen ist nicht direkt möglich. Technisch umsetzbar sind jedoch die Erfassung der bestockten und nichtbestockten Flächen sowie die Bestimmung messbarer Kriterien (Höhe, Flächengrösse, Bestandesbreite usw.).

Im Folgenden wird ein möglicher Arbeitsablauf vorgestellt, der zur Abgrenzung von bestockten und nicht bestockten Flächen führt. Weitere Möglichkeiten und Arbeitsabläufe zur Ausweisung von Waldflächen sind in OEHMICHEN *et al.* (2016), STRAUB *et al.* (2014), LOST *et al.* 2010 zu finden.

Auf Basis der nDOM kann eine vorab festgelegte Mindestvegetationshöhe erkannt wer-

Tab. 1. Walddefinitionen der nationalen Waldinventuren (k.A. = keine Angabe) *Richtwert für die praktische Anwendung (HAUK und SCHADAUER 2009; BMELV 2011; WSL 2013; FAO 2012).

Parameter der nationalen Waldinventur	Österreich	Deutschland	Schweiz	FAO
Minimale Fläche [m ²]	500	1000	k.A./500*	5000
Baumhöhe [m]	k.A./2*	k.A./2*	3	5
Kronenüberschirmung [%]	30	k.A./50*	20	10
Minimale Breite [m]	10	10	25	20

den, die in Form eines Schwellenwertes angewendet wird. Dieser liegt in der Regel, je nach Anwendungsbereich, zwischen 1 und 3 m (ZIELEWSKA-BÜTTNER *et al.* 2016a, b). Dadurch werden sämtliche Objekte eliminiert, die unter dieser Mindesthöhe liegen. Bei der Festlegung eines solchen Schwellenwertes ist zu beachten, dass die Trennung von Waldvegetation und anderen Vegetationsformen schwieriger wird, je niedriger er angesetzt wird. Bei niedrig angesetzten Mindesthöhen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Verwechslungen von Waldvegetation mit hoch aufwachsender krautiger Vegetation, zum Beispiel Maisfeldern, Grossgräsern, Hochstauden. Kleine Bäume in Pflanzungen und Naturverjüngungen werden aufgrund ihrer geringen Grösse nicht im Oberflächenmodell abgebildet.

Aufgrund der spezifischen Reflexionseigenschaften vitaler Vegetation können Parameter abgeleitet werden, die zur Differenzierung von unbewachsenen Oberflächen, lebender oder abgestorbener Vegetation dienen. Der bekannteste dieser Parameter ist der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Er berechnet sich aus dem Verhältnis der Werte des roten (R) und nahen infraroten (NIR) Spektralbereiches (siehe Formel 2).

Formel 2: NDVI

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Durch Anwendung dieses Vegetationsindex ist es möglich, mit einem Klassifikationsverfahren künstlich errichtete Objekte grösstenteils zu identifizieren.

Diese Kombination aus Höhen- und Spektralinformation erfasst grundsätzlich nur das sichtbare Kronendach. Darunter befindliche Objekte können nicht ausgewertet werden (z. B. Parkplätze oder Zeltplätze im Wald). Das Auswertungsergebnis enthält aber auch zum Beispiel Feldgehölze, Hecken, Parkanlagen, Obstanbauflächen, Kurzumtriebsplantagen und Energieholzflächen. Andererseits werden temporär (Schlagflächen) oder permanent (z. B. Holzlagerplatz, Forstwege) unbestockte Flächen, die per Definition zum Wald zählen könnten, nicht erfasst.

Je nach geltender Walddefinition und Aufgabe müssen diese Flächen zur Waldfläche hinzugefügt oder abgezogen werden. In einem (in der Regel) iterativen Prozess werden die räumlichen Beziehungen der verschiedenen bestockten und nichtbestockten Flächen unter Einbeziehung der Eigenschaften der Vegetationsobjekte gruppiert. Darüber hinaus stehen auch GIS-basierte automatisierte Verfahren zur Verfügung, die zum Beispiel durch Erkennung ihrer geometrischen Form an den Wald ansetzende Vegetationsteile wie Hecken identifizieren und abtrennen können. Zur Separierung von baumbestockten Nichtwaldflächen können zusätzlich geeignete Geodaten, zum Beispiel das Basis-DLM (Digitales Landschaftsmodell), integriert werden.

Um ein hochwertiges Ergebnis der Waldflächenkartierung zu erhalten, sind visuelle Überprüfungen und evtl. manuelle Bereinigungen der automatisiert generierten Ergebnisse unerlässlich. Diese müssen durch geschultes Fachpersonal erfolgen.

5.1.2 Kartierung von Lücken

Die Erfassung von Waldstrukturen ist für die Beantwortung von forstwirtschaftlichen und waldökologischen Fragestellungen von hoher Relevanz. Aus waldökologischer Sicht stellen insbesondere Lücken ein wertvolles Merkmal des Lebensraumes Wald dar. Sie entstehen durch Baumausfälle aufgrund natürlicher Alterungs- und Störungsprozesse (z. B. Windwürfe, Insektenbefall) sowie anthropogen bedingt durch Holzernte- und Erschliessungsmassnahmen. Waldlücken beeinflussen die Stabilität des Waldes sowie die Tier- und Pflanzenarten mit verschiedenen Habitatansprüchen. Sie können als hochwertige Biotope, die sich durch Lichteinfall, Temperaturniveau, Feuchteverhältnisse sowie Flora- und Faunazusammensetzung von ihrer unmittelbaren Nachbarschaft unterscheiden, angesehen werden. Aufgrund ihres Vegetationsangebotes stellen sie oft wichtige Flächen für Wildtiere dar (KOTREMBÄ 2014). Die flächige Erfassung von Lücken ist deshalb für wissenschaftliche Untersuchungen und ein gezieltes Waldmanagement von hohem Stellenwert.

5.1.2.1 Definition und Abgrenzung

Für die Erfassung von Waldlücken ist eine Definition des Objektes «Lücke» notwendig. Lücken können unterschiedlich definiert werden (SCHLIEMANN und BOCKHEIM 2011; ZIELEWSKA-BÜTTNER *et al.* 2016a). Im Allgemeinen werden sie als eine räumliche Unterbrechung (Unstetigkeit) des homogenen Deckungsgrades beschrieben (AFL 2003). Die räumliche Abgrenzung einer Lücke wird über folgende Parameter definiert, die beispielhaft in Abbildung 7 dargestellt sind:

- maximale Wuchshöhe der Lückenvegetation definiert durch
 - fixen Schwellenwert oder
 - in Relation zum umgebenden Bestand
- minimale und evtl. maximale Flächengrösse
- Lückenform (optional zur Identifizierung bestimmter Lückenarten wie Schneisen, kompakte Lücken eines bestimmten Umfang/Fläche-Verhältnisses u. Ä.)

5.1.2.2 Erfassungsmethoden

Waldlücken stellen flächenhafte Objekte dar. Sie können mittels Rasteranalyse eines VHM auf Grundlage einer schwellenwertbasierten Höhenabfrage der Rasterzellen erfolgen. Zellen, welche den Vorgaben einer definierten Lücke (z. B. Vegetationshöhe < 2 m, Mindestgrösse > 0,01 ha) entsprechen, werden selektiert und gegebenenfalls klassifiziert.

Techniken der vektorbasierten Objektanalyse ermöglichen eine weiterführende Charakterisierung der Lücke, zum Beispiel die Erfassung der Lückenform oder die Bestimmung des Lückenanteils in der Bezugsgeometrie (KOTREMBÄ 2014). Dies setzt eine vorhergehende Polygonisierung der Ergebnisse der Rasteranalyse voraus.

5.1.2.3 Erfassungsproblematik

Die beschriebenen Methoden weisen hinsichtlich ihrer Aussagesicherheit gewisse Grenzen auf. Reliefiertes Gelände (WANG *et al.* 2015), die Höhe des umgebenden Bestandes (ZIELEWSKA-BÜTTNER *et al.* 2016b), die komplexe Struktur der Waldbestände (WANG *et al.* 2015; ADLER *et al.* 2014) sowie Zeitpunkt und Technik der Luftbildaufnahme und damit assoziierte Licht- und Schattenverhältnisse beeinflussen das Image Matching und dadurch auch die Lückenerfassung. Oft sind in diesen Bereichen fehlerhafte oder keine Matching-Punkte und Höheninformationen ermittelbar. Fehlerhafte Informationen sollten daher vor der Analyse gefiltert werden. Nicht vorhandene Informationen können im Nachhinein mithilfe der umliegenden Zellen interpoliert werden. Diese Interpolation ist in den gängigen Softwarepaketen bereits in den Matching-Prozess integriert. Diese Einflüsse machen die Lückenerfassung oft problematisch und führen zu Ungenauigkeiten.

Abbildung 8 zeigt den Einfluss des Sonnenstandes zum Zeitpunkt der Aufnahme auf den kleinräumigen Schattenwurf und die Auswirkung unterschiedlicher Aufnahmepositionen auf kleinräumige nicht erfasste Gebiete. Diese stellen sich als No-Data-Bereiche dar.

Das Image-Matching-Ergebnis wird zudem durch die geometrische Auflösung und den Überlappungsgrad der Luftbilder bestimmt (Kap. 3.1.2). Die Anzahl der übereinstimmenden Bildpunkte pro Zelle nimmt starken Einfluss auf die Qualität des DOM beziehungsweise VHM und damit auch auf die Güte der Lückenkartierung. Neben den Eingangsdaten sind die Ergebnisse der Lückenkartierung auch von den ver-

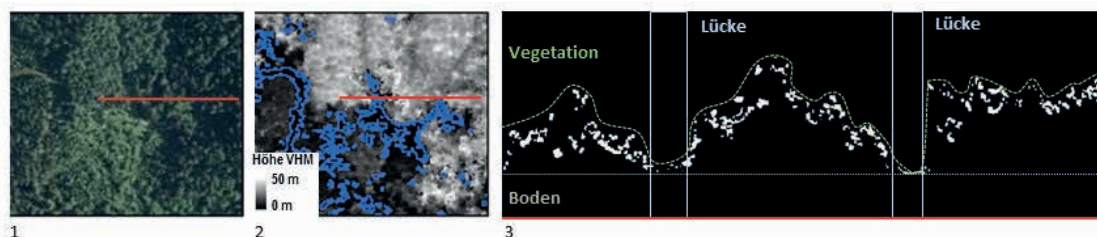


Abb. 7. Beispielhafte Darstellung der Lückenkartierung entlang einer Profillinie (rot) in einem Orthophoto (1), nDOM (2) und der zugrunde liegenden Image-Matching-Punktwolke (3). Quelle: K. Zielewska-Büttner, FVA Baden-Württemberg.

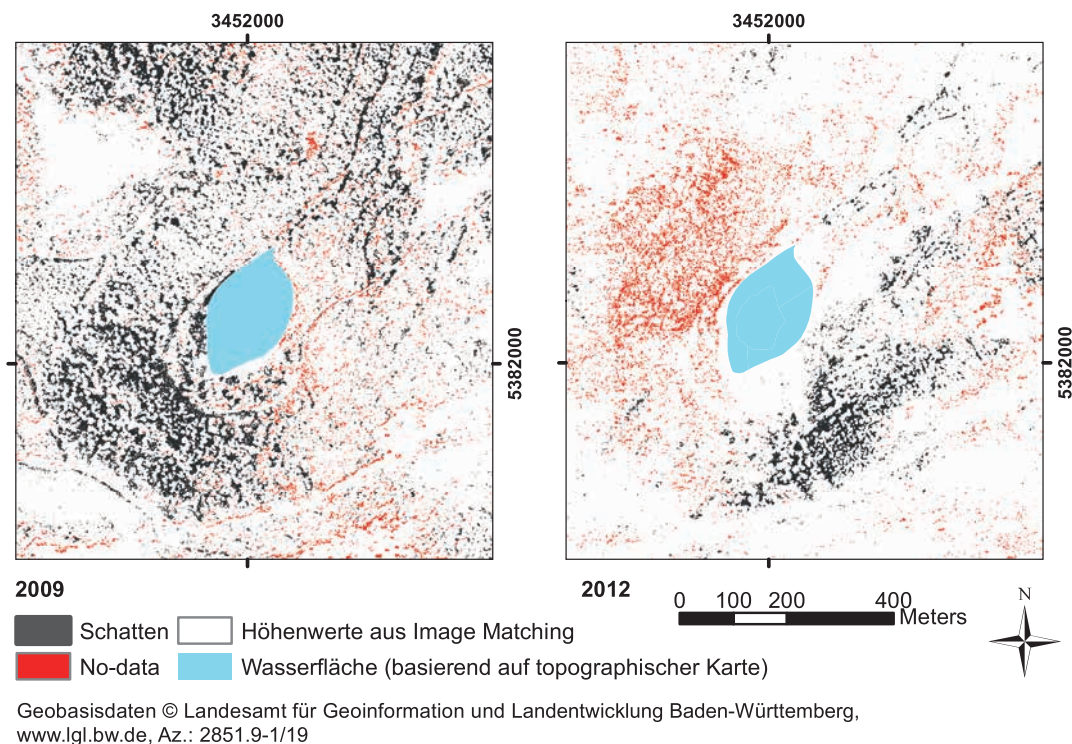


Abb. 8. Einfluss des Sonnenstandes auf Schattenwurf und Oberflächenberechnung aus zwei Befliegungen von 2009 und 2012 (beide 20 cm Bodenauflösung, 60/30 Prozent Überlappung, radiometrische Auflösung 8 und 16 Bit für Jahre wie angegeben). Quelle: ZIELEWSKA-BÜTTNER *et al.* (2016b).

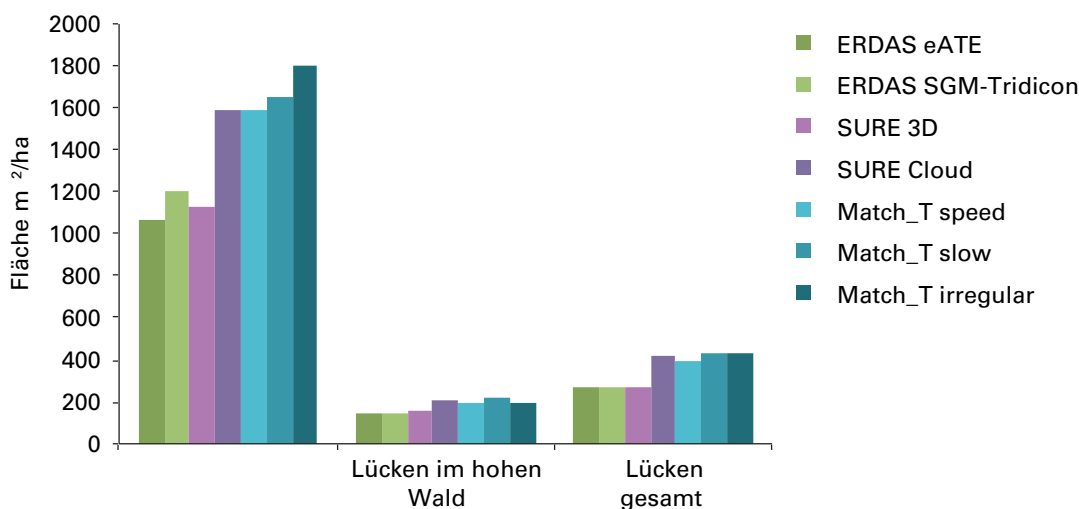


Abb. 9. Kartierte Lückenflächen pro Hektar in Abhängigkeit vom verwendeten Matching-Verfahren basierend auf einem Luftbilddatensatz von 2014, Testfläche bei Pforzheim. Quelle: Zielewska-Büttner, FVA.

wendeten Matching-Verfahren abhängig, wie Abbildung 9 verdeutlicht. Auf einer Waldfläche von 6950 ha wurden VHM mit unterschiedlichen Matching-Algorithmen erstellt und auf deren Basis Lücken kartiert. Das Ergebnis zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen den verschiedenen Verfahren. Die kartierten Lückenflächen schwanken zwischen 430 und 270 m²/ha.

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Lückenkartierung basierend auf verschiedenen Matching-Verfahren (eATE, SURE Cloud, Match-T irregular) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich Lage, Form, Grösse und Anzahl der erfassten Lücken in Abhängigkeit vom genutzten Algorithmus unterscheiden.

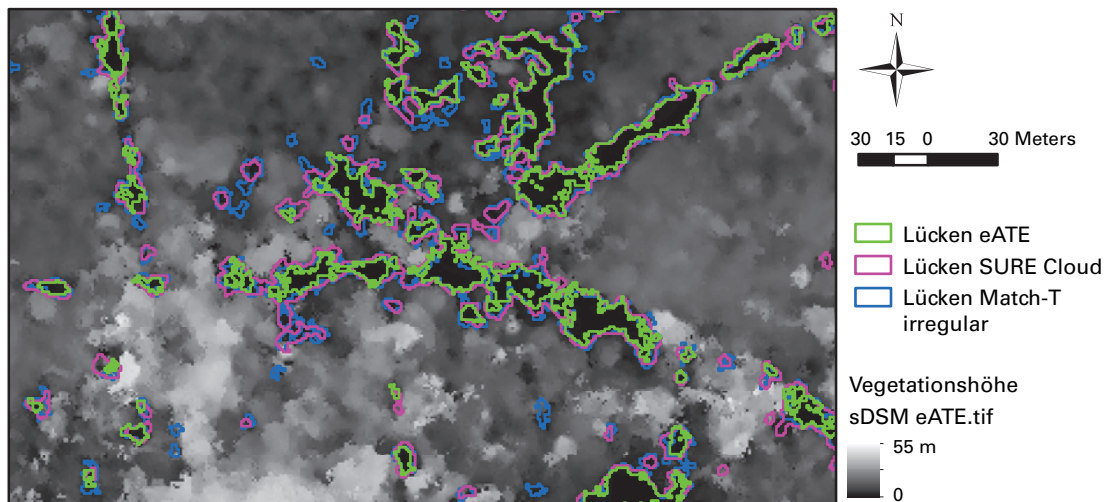


Abb. 10. Unterschiede in den Ergebnissen der Lückenerfassung mithilfe von nDOM, die mit verschiedenen Image-Matching-Algorithmen für einen Luftbilddatensatz von 2014 auf einer Testfläche bei Pforzheim erstellt wurden. Farbliche Darstellung in Anlehnung an die Abbildung 9. Quelle: Zielewska-Büttner, FVA.

5.1.3 Einzelbaumhöhen

Die Bestimmung der Höhen von Einzelbäumen ist für verschiedene forstliche Anwendungen relevant. Dazu zählen unter anderem:

- Vorratsschätzungen
- Ableitung von Durchmesservertellungen
- Unterstützung der Baumartenklassifizierung
- Habitatmodellierungen

Um die Höhe von Einzelbäumen zu erfassen, muss vorab die Lage der Einzelbäume bestimmt werden. Für die Einzelbaumdetektion existieren verschiedene Methoden.

Die häufigste Methode zur Detektion von Einzelbäumen ist die Suche nach lokalen Maxima, die im nDOM oder DOM die Baumspitzen repräsentieren. Am erfolgreichsten können mit diesem Verfahren Nadelbäume, insbesondere Fichten und Tannen mit charakteristischer Kronenausprägung, detektiert werden. Laubbäume mit ihren runden Kronen haben oft kein oder mehr als ein deutliches Maximum. Daher sind ihre Baumspitzen nicht eindeutig zu bestimmen. Darüber hinaus ist die Erfolgsquote stark von der Bestandesstruktur und der Bestandesdichte abhängig. Diese vielen Abhängigkeiten machen eine erfolgreiche Detektion von Einzelbäumen schwierig.

Methoden zum Clustering der rohen Punktwolken, wie sie bei LiDAR-Daten angewandt werden, führen bei Punktwolken aus Image Matching nicht zu besseren Ergebnissen.

Eine andere Möglichkeit die Kronen zu identifizieren, ist die Bildsegmentierung von optischen Daten, die mit weiteren Rasterinformationen (z.B. DOM, nDOM) kombiniert werden. Alle für die Segmentierung relevanten Eingangsinformationen müssen räumlich kongruent sein. Daher ist es sinnvoll, ein geglättetes DOM als Referenzoberfläche für die Entzerrung der Luftbilder und aller weiteren Zusatzdaten heranzuziehen. Ein Bildpunkt (Pixel) wird dadurch neben seinen Koordinaten durch zum Beispiel Höhe über Gelände oder spektrale Signatur beschrieben. Pixel mit ähnlichen Eigenschaften werden zu Objekten zusammengefasst. Gängige Algorithmen dafür sind zum Beispiel k-mean Clustering oder Region growing. Die segmentierten Objekte repräsentieren im optimalen Fall eine Baumkrone. Diese Kronenpolygone werden im Anschluss für die Bestimmung der Kronenhöhen aus dem nDOM herangezogen, indem das Maximum des nDOM innerhalb des Polygons ermittelt wird. Operationelle Anwendungen dieses Verfahrens für grosse Gebiete sind derzeit nicht bekannt. Die Zuverlässigkeit von Bildsegmentierungen ist sehr vom Bildmaterial und den Waldstrukturen abhängig.

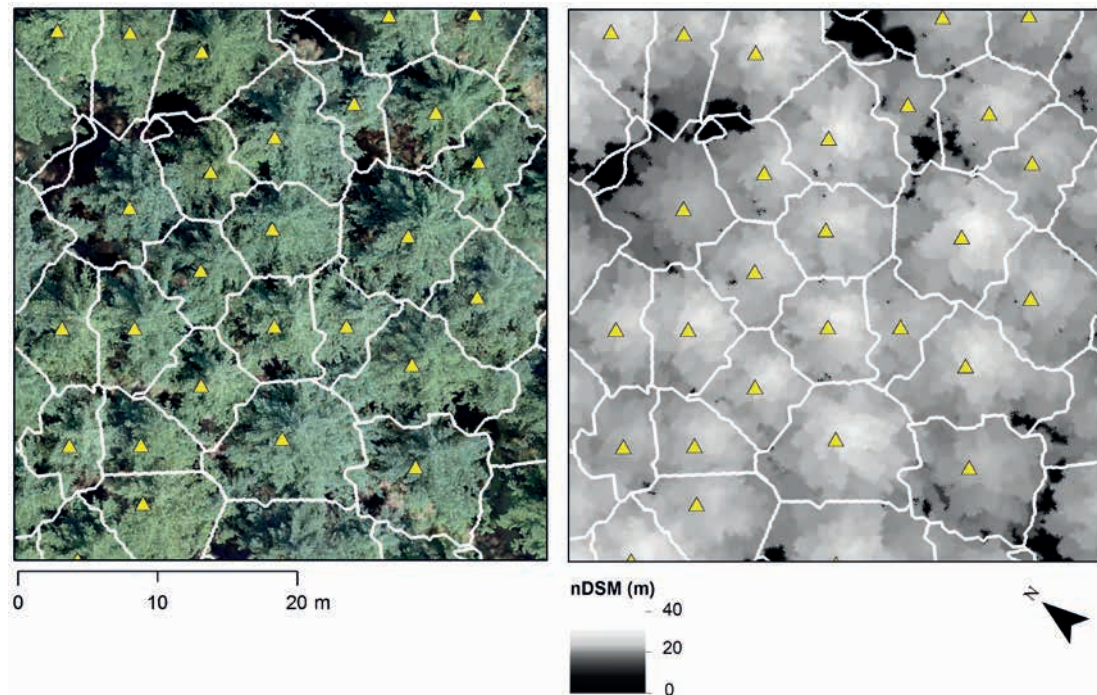


Abb. 11. Einzelbaumsegmentierung mittels Watershed-Algorithmus basierend auf einem nDOM aus Image Matching von Luftbildern aus einer Drohnen-Befliegung über einer Douglasien-Versuchsfläche im Südschwarzwald in 2017. Die gelben Dreiecke markieren die Baumspitzen, während die weißen Segmente das Resultat des Watershed-Algorithmus darstellen. Hintergrund: Orthophoto (links) und nDOM (rechts). Quelle: S. Ganz, FVA Baden-Württemberg.

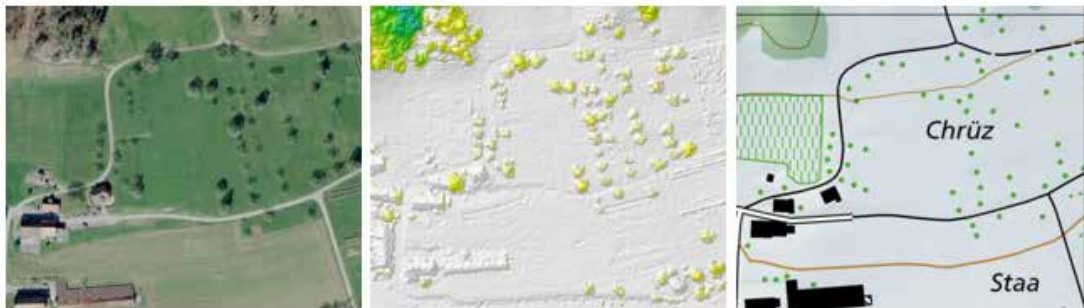


Abb. 12. Orthophoto swissimage (links), VHM Landesforstinventar Schweiz (Mitte), Landeskarte 1:10000 mit extrahierten Einzelbäumen swisstopo (rechts). Quelle: GINZLER und HOBI (2015).

Die erreichbaren Genauigkeiten bei der Bestimmung von Einzelbaumhöhen mit operationell erhobenen Daten in der Schweiz (Luftbilder mit einer mittleren Bodenauflösung von 25 cm) belaufen sich auf ± 3 m (GINZLER und HOBI 2016). Die Höhen aus dem nDOM wurden in dieser Studie mit terrestrisch gemessenen Baumhöhen verglichen. Diese terrestrischen Messungen weisen allerdings auch einen gewissen Fehler auf. Doppelmessungen im Schweizer Landesforstinventar haben bei Laubbäumen eine mittlere Abweichung von 1,9 m und bei Nadelbäumen von 1,3 m ergeben. Dies relativiert die erreichbaren Genauigkeiten mit Image Matching basierten nDOM. SIBONA *et al.* (2016) haben festgestellt, dass Höhenbestimmungen mittels LiDAR-Daten näher bei realen Baumhöhen sind als terrestrische Lasermessungen. Für die Bestimmung von Einzelbaumhöhen aus Image Matching basierten nDOM sind eine hohe Bildauflösung ($\leq 0,2$ m) und eine hohe Längsüberlappung (≥ 80 %) von Vorteil (Kap. 3.1.2). HIRSCHMUGL *et al.* (2007) konnten mit einer sehr hohen Bildüberlappung (90 %) und einer Bodenauflösung von 15 cm Baumhöhen der Oberschicht mit einer Genauigkeit von $\pm 2,4$ m ermitteln.

Gute Erfolgschancen verspricht die Erkennung von Einzelbäumen und einzeln freistehenden Bäumen (z. B. Stadtbäume, Bäume in landwirtschaftlichen Gebieten, Überhälter im Wald) und damit die Bestimmung derer Höhen (Abb. 12).

Für dichte Bestände mit hohem Überschirmungsgrad kann eine Einzelbaumdetektion mit anschliessender Höhenbestimmung nicht empfohlen werden. Für die klassische Forsteinrichtung sind Höheninformationen auf Bestandesebene besser geeignet.

5.1.4 Bestandeshöhe aus Vegetationshöhensegmenten

Der Erfassung von Bestandeshöhen kommt insbesondere bei Forstinventuren eine zentrale Rolle zu. Verfahrensbedingt unterscheiden sich die fernerkundlich erfassten Vegetationshöhen von den terrestrisch erhobenen Bestandeshöhen. Terrestrisch werden Höhenwerte von Einzelbaumkollektiven verwendet, um einen repräsentativen Wert für einen Bestand zu erhalten. Aus Fernerkundungsdaten werden flächige Höhenparameter für den Oberstand berechnet. Daher müssen für die Zusammenführung beider Ansätze geeignete Modelle konzipiert werden.

Eine Methode zur Bestandeshöhenmessung basiert auf der Verwendung von Vegetationshöhensegmenten. Segmentierungsverfahren werden für die Erfassung von Objekten sowie zur Abgrenzung von weitgehend homogenen Oberflächen angewendet. Homogenität bezieht sich hier auf die Ausprägung des Merkmals «Höhenverteilung». Hierfür eignen sich besonders Segmentierungsansätze, die ein iteratives Flächenwachstum einschliessen.

Für die grossräumige Beschreibung von Bestandeshöhen mittels Vegetationshöhensegmenten hat sich die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise bewährt, die in Abbildung 13 skizziert ist (COENRADIE *et al.* 2012):

- a) Zunächst sind eine forstwirtschaftlich relevante Bestandeshöhenkategorisierung und Mindestflächengrössen für die neu zu bildenden Vegetationshöhensegmente festzulegen. Diese Vorgaben sind so zu treffen, dass sowohl die jeweils regionalen Waldstrukturen verlässlich differenziert werden können, als auch die Ergebnisse mit bestehenden Forsteinrichtungsdaten harmonisieren. Die Höhenkategorien können sich beispielsweise an der Höhencharakteristik von Wuchsklassen orientieren (u. a. Jungwuchs, geringes/mittleres Stangenholz, Baumholz) beziehungsweise diese weiter gliedern. Als Mindestflächengrösse der resultierenden Segmente bietet sich die kleinste Bewirtschaftungseinheit der Forsteinrichtung an (u. a. Freistaat Sachsen: 0,2 ha). Optional können vorhandene Flächengrenzen beziehungsweise Geometrien, beispielsweise Waldeinteilungen aus Forstgrundkarten, integriert werden.
- b) Die Segmentierung des VHM beginnt mit der Lokalisierung von Höhenmaxima. Hierfür können Moving-window-Ansätze angewendet werden. Für die angestrebte flächige Bestandeshöhenerfassung ist dabei die vollständige Kartierung von Einzelkronen nicht zwingend notwendig. Die Höhenmaxima werden abschliessend klassifiziert.
- c) In einem iterativen Flächenwachstumsprozess erfolgt die Ableitung von weitgehend homogenen Vegetationshöhensegmenten. Als Startpunkte dienen die Höhenmaxima. Es gilt hierbei, schrittweise kleinere Segmente aufgrund von Flächenmerkmalen (u. a. Grösse, Form, Höhe) unter Berücksichtigung ihrer unmittelbaren Umgebung zu grösseren Einheiten zusammenzuführen. Diese Aggregationen erfordern Zuweisungskriterien, die in einem Regelwerk festgelegt werden.
- d) Nach Erreichen der Mindestflächengrösse liegt das Segmentierungsergebnis als flächenscharfe Kartierung der Waldfläche vor.
- e) Verschneidungen der Segmentpolygone mit digitalen Forstgrundkarten ermöglichen Analysen und Modellierungen auf Bestandes- oder Teilflächenebene.
- f) Auf der Basis der VHM können somit Höhenstatistiken für Einzelsegmente berechnet werden.

Um sich dem terrestrisch geschätzten Parameter «Oberhöhe aus der Forsteinrichtung» zu nähern, sollte ein neues Attribut «Bestandesoberhöhe aus Luftbilddaten» eingeführt werden. Bewährt hat sich hierbei die segmentweise Berechnung des arithmetischen Mittelwerts für die Werteverteilung der Höhen über dem Perzentil80. Vergleiche zeigten eine

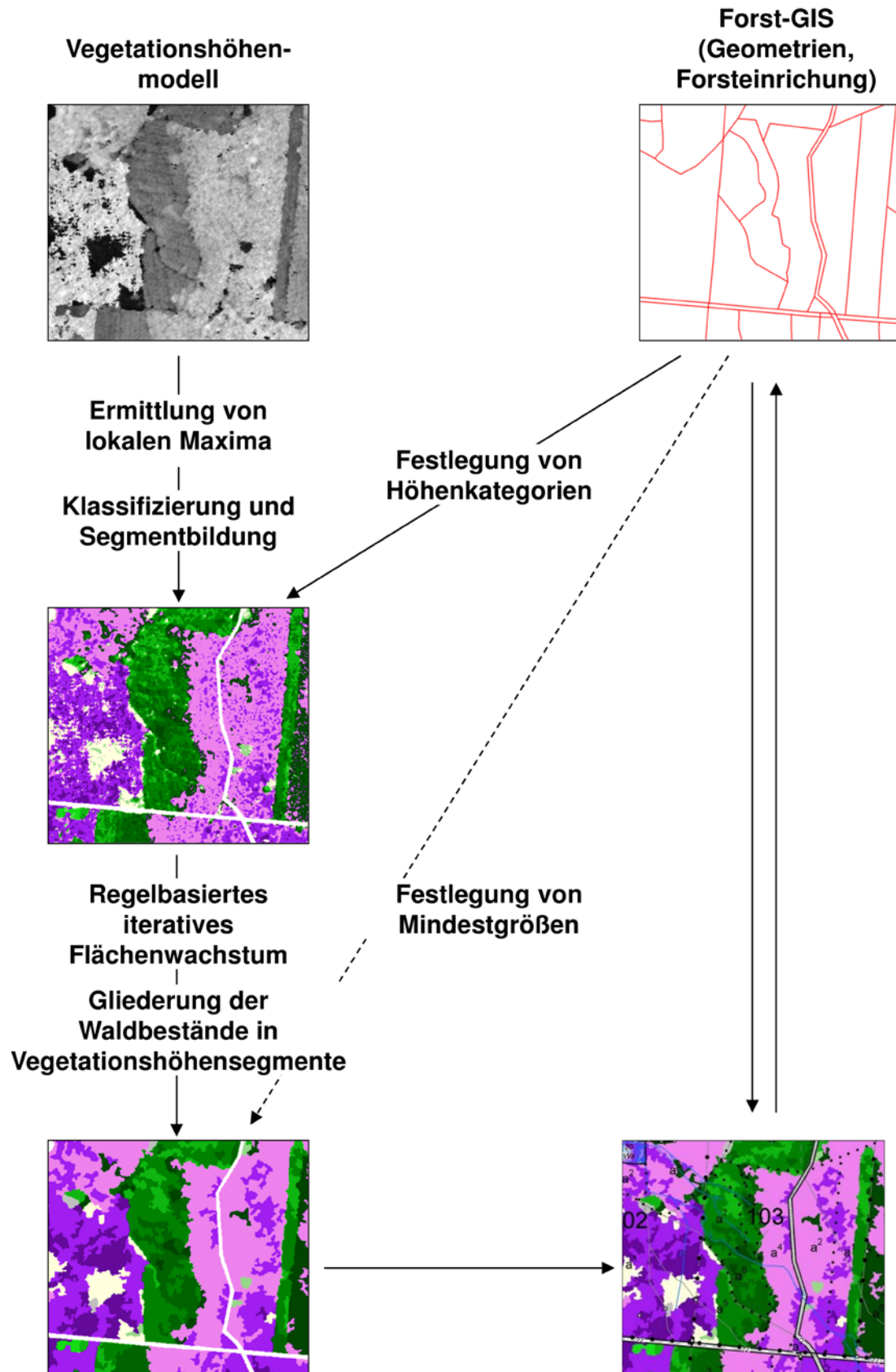


Abb.13. Arbeitsablauf zur Ableitung von forstwirtschaftlich relevanten Vegetationshöhensegmenten. Quelle: nach COENRADIE *et al.* (2012).

zufriedenstellende Übereinstimmung mit der Weise'schen Oberhöhe, die definiert ist als die Höhe des Grundflächenmittelstamms der 20 Prozent stärksten Bäume eines Bestandes (KRAMER und AKCA 2008).

Der Vergleich der Lorey'schen Mittelhöhe an 297 Stichprobenpunkten mit Höhen aus dem VHM zeigt unterschiedliche Abweichungen je nach verwendetem Matching-Algorithmus. Bei einem SGM-Ansatz ergibt sich eine absolute mittlere Überschätzung durch das Luftbild von 55 cm und eine Unterschätzung von 1,5 m bei der Verwendung eines feature-based Ansatzes (ULLAH *et al.* 2015).

5.1.5 Überschirmungsgrad

Die Überschirmung stellt einen wichtigen Waldstrukturparameter dar, der insbesondere für forstwirtschaftliche Fragestellungen hohe Relevanz besitzt. Sie wird in der forstlichen Praxis auch als Deckungsgrad, Kronenüberschirmung, Kronenschluss, Kronenschlussgrad oder Schlussgrad bezeichnet.

Für die Bestimmung eines Überschirmungsgrades muss eine Bezugsfläche definiert werden. Diese kann entweder eine Bestandes- oder Behandlungsfläche oder eine Probefläche von Inventuren sein. Die Grösse der Probefläche ist in den meisten Waldinventuren vorgegeben. Der Überschirmungsgrad kann als Mass beziehungsweise Abschätzung der Bestandesdichte fungieren (STRAUB 2010). Hierbei finden Überlappungen der Kronen keine Berücksichtigung. Während der Bestockungsgrad (aus Ertragstafeln

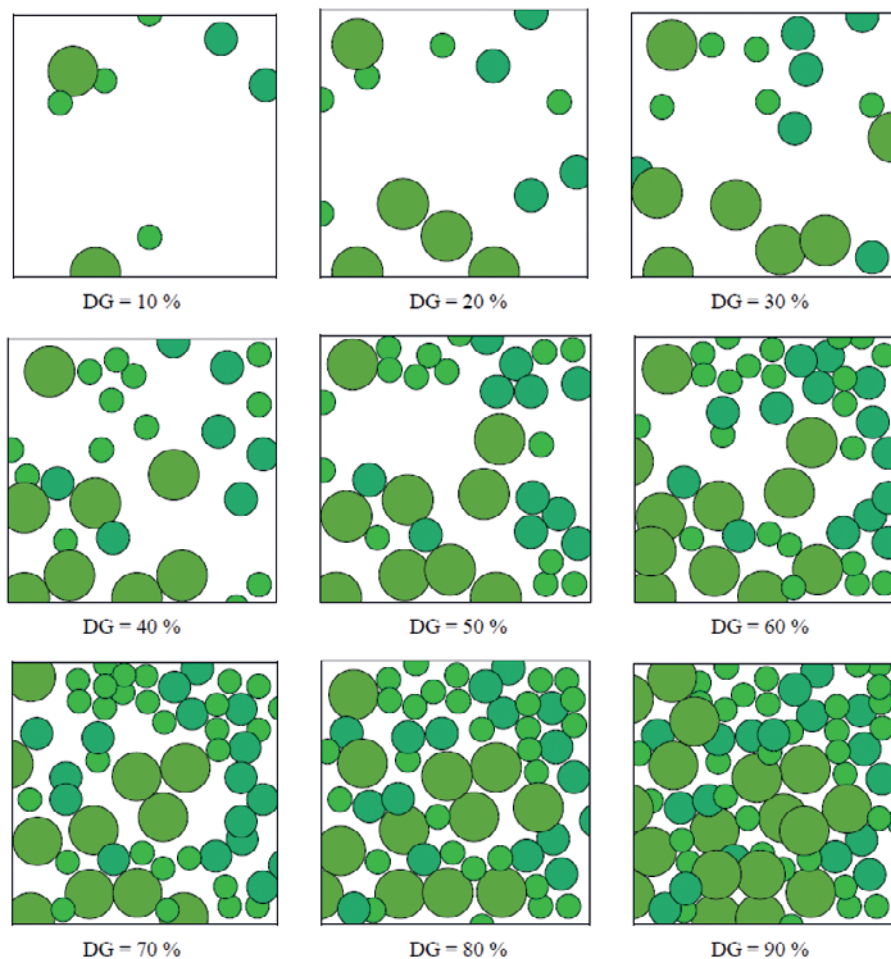


Abb. 14. Schematische Darstellung verschiedener Überschirmungs- beziehungsweise Deckungsgrade (DG). Quelle: AFL 2003.

errechnet) Werte über 1 annehmen kann, endet der Wertebereich des Überschirmungsgrades bei 100 Prozent (Abb. 14).

Der Überschirmungsgrad kann mittels Rasteranalyse eines VHM ermittelt werden. Hierzu wird eine schwellenwertbasierte Höhenabfrage der Rasterzellen durchgeführt. Der Schwellenwert kann relativ zur Umgebungshöhe (z. B. maximale Umgebungshöhe $\times 0,5$) oder absolut definiert werden. Rasterzellen über dem Schwellenwert werden als überschirmte Fläche selektiert. Die Summe der ausgewählten Rasterzellen im Verhältnis zur Referenzfläche ergibt den Überschirmungsgrad. Dieser ist ein Mass für die Flächenbesetzung durch die Baumkronen. Grössere Bereiche ohne Kronenüberschirmung können als Lücken (Kap. 5.1.2) definiert werden.

5.1.6 Überhälter und Restbestockung

Überhälter und Restbestockungen können mithilfe von VHM separiert werden. Sie können aufgrund ihrer charakteristischen Form sowohl maschinell als auch visuell detektiert werden. Die Erkennbarkeit steigt mit dem Höhenunterschied zu benachbarten Bestandesflächen. Der Mindesthöhenunterschied des Überhelters oder Bestandesrestes zur Umgebung orientiert sich unter anderem an der Oberstand-Definition der terrestrischen Forsteinrichtung (Staatsbetrieb Sachsenforst 2011). Auch ein Mindestabstand von Einzelbäumen zu benachbarten geschlossenen Bestandesteilen wirkt sich positiv auf die Erkennbarkeit aus. Folglich sind in den Bestand eingewachsene Überhälter in einem VHM nicht detektierbar, wenn sie die gleiche Höhe wie der sie umgebende Bestand aufweisen.

Die Methode setzt auf der Detektion von Einzelbäumen (Kap. 5.1.3) an. Innerhalb von Baumholzbeständen werden Einzelbäume in erster Linie über Abstandsmasse selektiert. Ausgehend von den selektierten Höhenmaxima erfolgt ein iteratives Flächenwachstum zur näherungsweise Abgrenzung der Kronen. Im VHM werden angrenzende Pixel zu Kronensegmenten zusammengeführt, wenn deren Höhenwerte weniger als $\frac{1}{3}$ vom jeweiligen Maximum abweichen. Die Mindesthöhe von Einzelbäumen variiert in Abhängigkeit von der Baumhöhenklasse.

Überhälter und Einzelbäume im Baumholzalter, deren Höhe diejenige des umgebenden Bestandes beziehungsweise des Unterstandes um mehr als $\frac{1}{3}$ überschreitet, können nahezu vollständig erfasst werden. Der Anteil erfasster Einzelbäume und Baumgruppen in luftbildbasierten VHM ist geringer als der in LiDAR-basierten VHM. Die Verteilung der Fehler korreliert mit Schattenbereichen und lässt auf eine fehlerhafte automatische Bildkorrelation im Rahmen der DOM-Prozessierung schliessen.

5.2 Entwicklung von statistischen Modellen

Statistische Modelle werden verwendet, um Stichprobendaten auf die gesamte Waldfläche mittels Hilfsinformationen aus Fernerkundungsdaten zu übertragen. Dies wird auch Regionalisierung genannt. Dabei werden Zusammenhänge zwischen abgeleiteten Variablen aus einem VHM und dendrometrischen Kenngrössen an Stichprobenpunkten einer Forstinventur untersucht und quantifiziert (NÆSSET 2002; HOLLAUS *et al.* 2007; WHITE *et al.* 2013; STEPPER *et al.* 2014). Das Verfahren setzt voraus, dass einerseits eine ausreichend hohe Anzahl von repräsentativen, möglichst genau georeferenzierten Stichproben zur Verfügung steht. Andererseits darf die zeitliche Differenz zwischen Luftbildbefliegung und Stichprobenerhebung nicht zu gross sein, da Durchforstungen, Endnutzungen, Schadereignisse und Wachstum zu Waldveränderungen führen, die eine Vergleichbarkeit nicht mehr gewährleisten.

Zur Regionalisierung von Forstinventuren können VHM und terrestrische Daten in einem statistischen Modell kombiniert werden (Abb. 15). Dieser in der Praxis bewährte Verfahrensablauf ist nachfolgend dargestellt:

- a) Die Stichprobenkreise der Forstinventur werden zuerst mit dem VHM räumlich verknüpft, um mehrere Fernerkundungsvariablen für die flächige Modellierung an den Stichprobenpunkten abzuleiten. Als Variablen eignen sich vor allem Höhen- und Dichte- beziehungsweise Überschirmungsmetriken aus dem VHM.

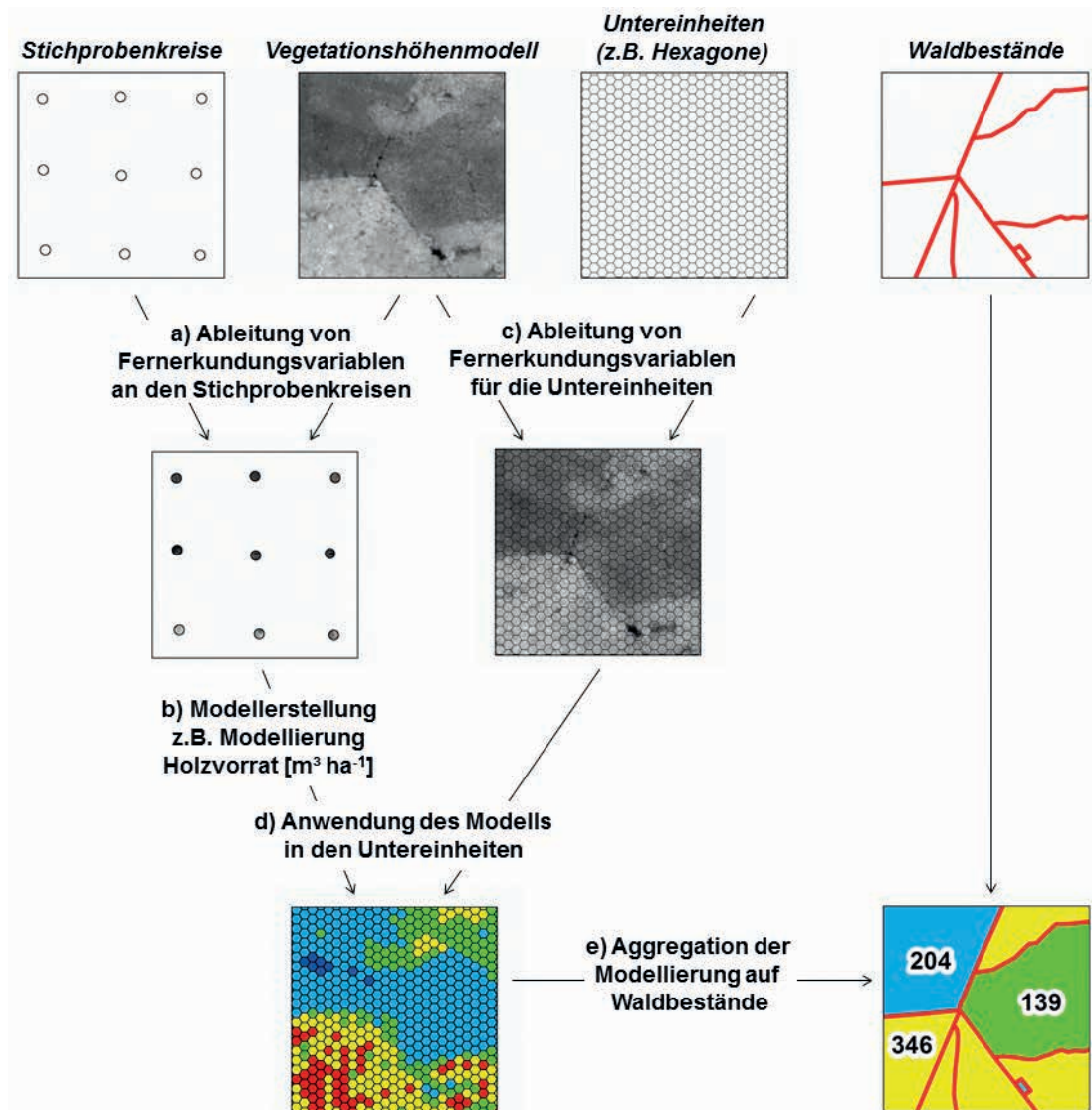


Abb. 15. Arbeitsablauf für die Regionalisierung von Forstinventuren durch Kombination von VHM und terrestrischen Daten. Quelle: nach STEPPER *et al.* (2014).

- An den Stichprobenpunkten werden anschliessend Zusammenhänge zwischen den aus Felddaten abgeleiteten, dendrometrischen Kenngrössen (wie z.B. der Holzvorrat in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) und den abgeleiteten Fernerkundungsvariablen statistisch untersucht, um geeignete Modelle zur Schätzung dieser Kenngrössen zu erstellen. Für diese Modellierung können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden wie zum Beispiel Multiple Regressionen, k Nearest Neighbour (kNN) oder Random Forest (RF).
- Die Genauigkeit der Modellierung wird häufig mittels einer Kreuzvalidierung überprüft.
- Die Waldfläche wird in kleine Untereinheiten (z.B. Hexagone oder Quadrate) unterteilt, welche dieselbe Flächengrösse wie eine Stichprobe der Inventur aufweisen. In jeder Untereinheit werden erneut die benötigten Fernerkundungsmerkmale abgeleitet.
- Das an den Stichprobenpunkten kalibrierte Modell (siehe Arbeitsschritt b) wird auf jede Untereinheit übertragen. Als Ergebnis stehen flächige Karten zur räumlichen Verteilung von forstlichen Kenngrössen zur Verfügung.
- Da in der forstlichen Praxis häufig Informationen auf der Ebene von Waldbeständen notwendig sind, können die Schätzungen in den Untereinheiten auf Bestandesgeometrien aggregiert werden, um dadurch Aussagen für einzelne Waldbestände herleiten zu können.

Das dargestellte Verfahren eröffnet Möglichkeiten zur praktischen Anwendung im Forstbereich, insbesondere zur Unterstützung der Forsteinrichtung durch Schätzung

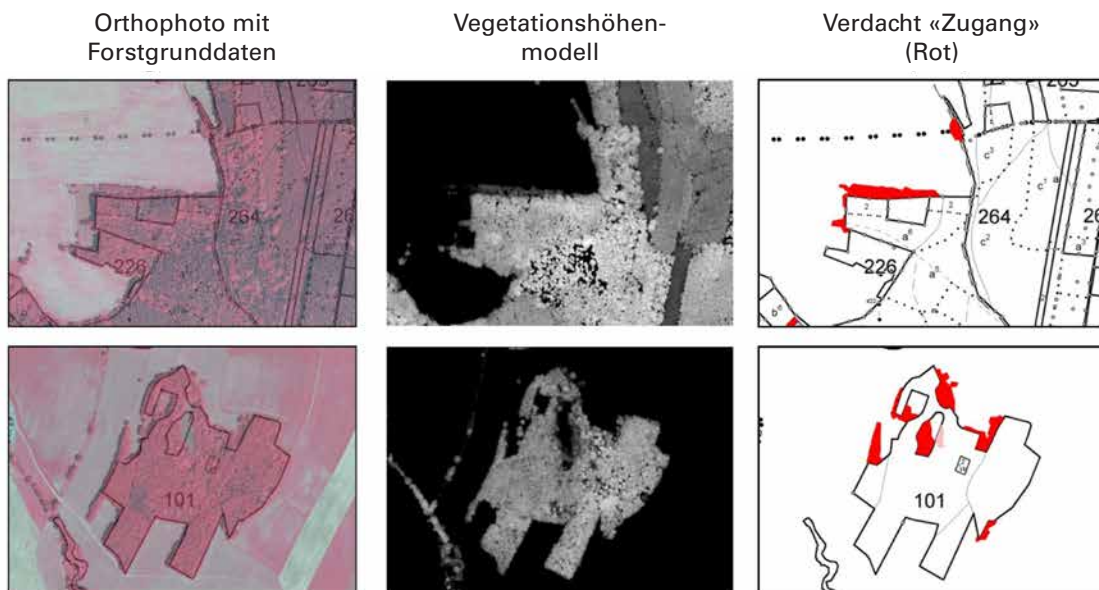
- der Bestandeshöhe
- der Biomasse
- des Vorrats

5.3 Monitoring und Zeitreihenanalyse

Monitoring ist die langfristige, dauerhafte Beobachtung der Waldeigenschaften. Das Ziel ist es, die Veränderungen des Waldes in Zeit und Raum zu erfassen. Die Anwendungsfelder erstrecken sich von der räumlichen Schadensdetektion und -quantifizierung über das Waldflächenmonitoring (Zu- und Abgänge, Abb. 16) bis hin zu Massnahmenkontrolle und betrieblichem Management.

Eine Möglichkeit des Monitorings ist die Zeitreihenanalyse. Zeitreihen sind Datensätze zweier oder mehrerer temporal aufeinanderfolgender Aufnahmen des gleichen Raumausschnittes. Der Vergleich dieser Datensätze ermöglicht die Feststellung von Unterschieden, sodass für den entsprechenden Zeitraum eine räumlich detaillierte Veränderungsanalyse, englisch «Change Detection», durchgeführt werden kann.

Waldflächenzugänge



Waldflächenzugänge



Abb. 16. Kartierung von potenziellen Flächen des Waldzu- oder abgangs für die Forstgrunddaten.
Quelle: HOFFMANN (2014).

Veränderungen können über verschiedene beobachtete Parameter detektiert werden. Eine besondere Rolle spielen dabei die jeweiligen Erfassungstermine der Aufnahmen (z.B. bei der forstlichen Schadenserfassung). Der zeitliche Abstand der Aufnahmen hängt von der Fragestellung und vor allem bei retrospektiven Analysen vom Datenangebot ab (z.B. dem Befliegungsturnus bei Luftbildern).

Aus Luftbildern abgeleitete 3D-Informationen (DOM/nDOM) können für Monitoring-zwecke und Zeitreihenanalysen von forstlichen Kenngrößen verwendet werden. Dabei werden Veränderungen in der Vegetationshöhe durch den Vergleich zeitlich aufeinander folgender, gleichartiger Höhenmodelle des gleichen Raums erfasst. Durch einfache Subtraktion der Höhenmodelle werden die sich unterscheidenden Bereiche auswertbar. Abbildung 17 illustriert Veränderungen in Profilschnitten zweier DOM.

Bei der Verwendung von Oberflächenmodellen für eine Zeitreihe ist zu beachten, dass die Oberflächenmodelle keine fehlerfreie Abbildung der Bestandesoberfläche darstellen. Veränderungen in der Aufnahmegeometrie, des Aufnahmezeitpunkts, des Schattenwurfs und der Witterung zum Flugzeitpunkt beeinflussen die aus Luftbildern abgeleiteten Oberflächenmodelle (Kap. 3.1.2). Dadurch kann es beim direkten Vergleich

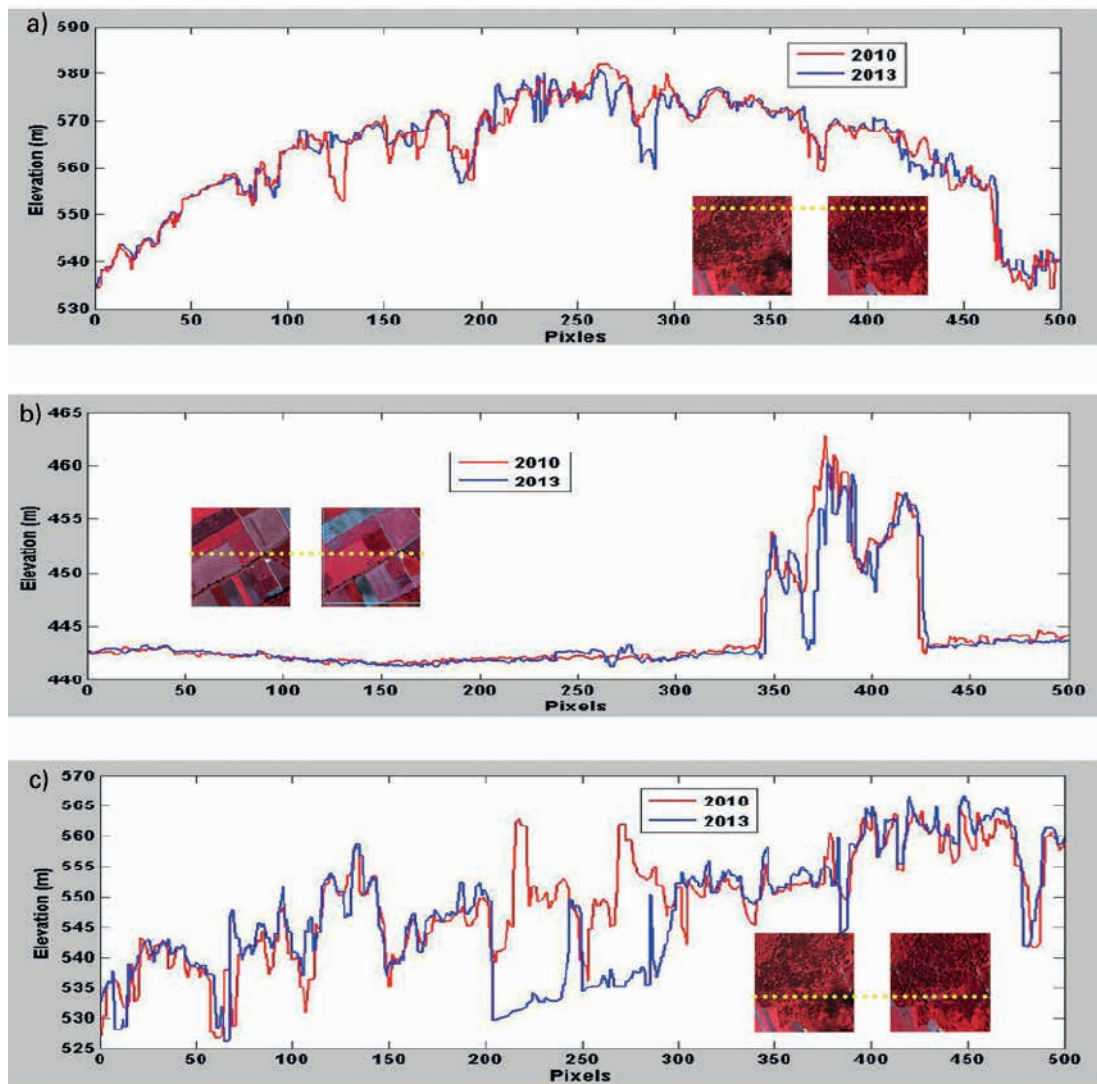


Abb. 17. Analyse von DOM-Profilen. Die Bildpaare stammen aus dem Jahr 2010 (linkes Luftbild) beziehungsweise 2013 (rechtes Luftbild). Die gelb gestrichelte Linie kennzeichnet die Lage der Profile. Die roten und blauen Linien zeigen die Profilverläufe. Von oben nach unten: (a) Gehölzfläche ohne Veränderungen, (b) Ackerland ohne Veränderungen, (c) Gehölzfläche mit Veränderungen. Quelle: WANG *et al.* (2015).

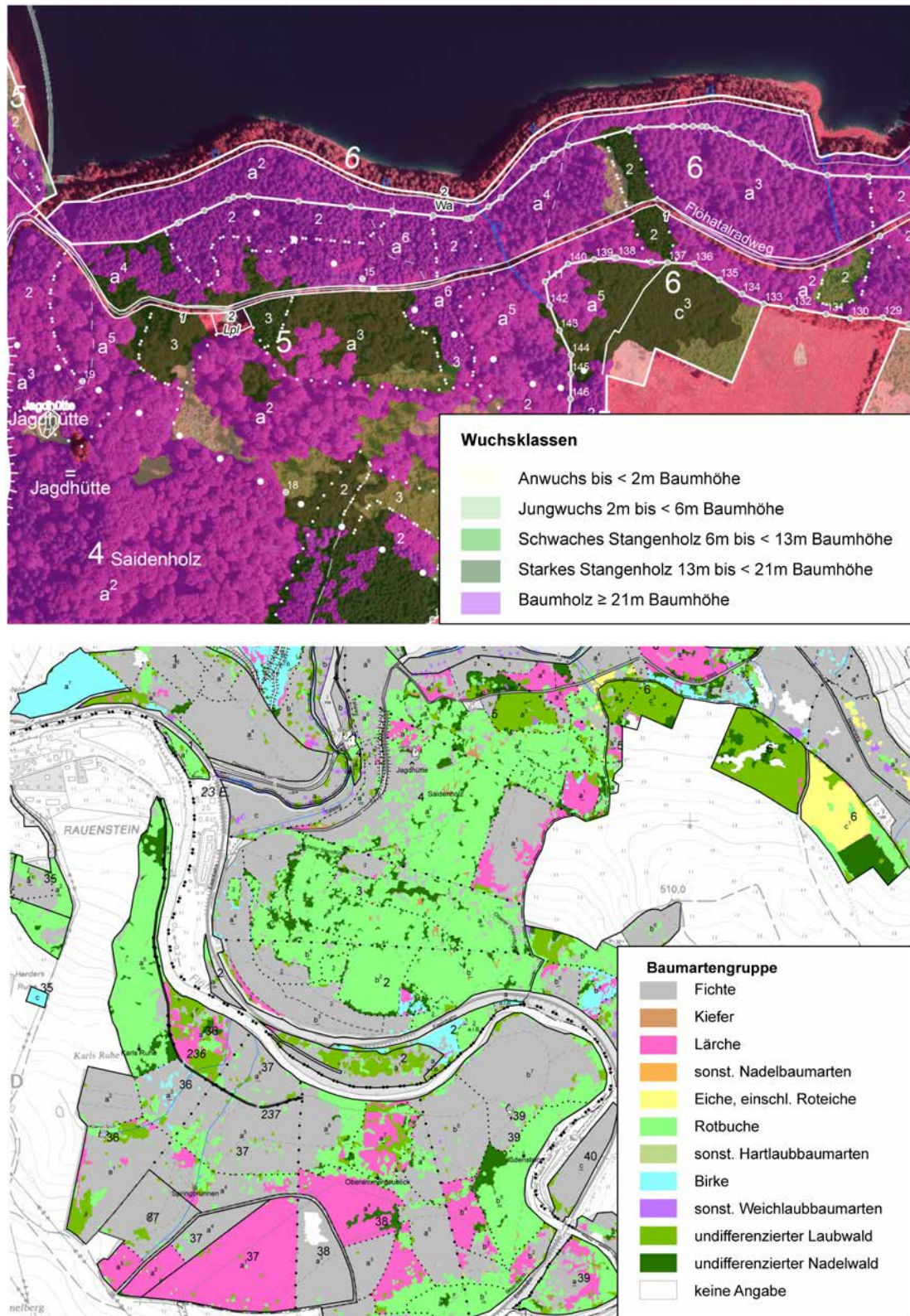


Abb. 18. Wuchsklassen (oben) und Baumartengruppen aus Fernerkundungsdaten (unten). Quelle: HOFFMANN *et al.* (2017).

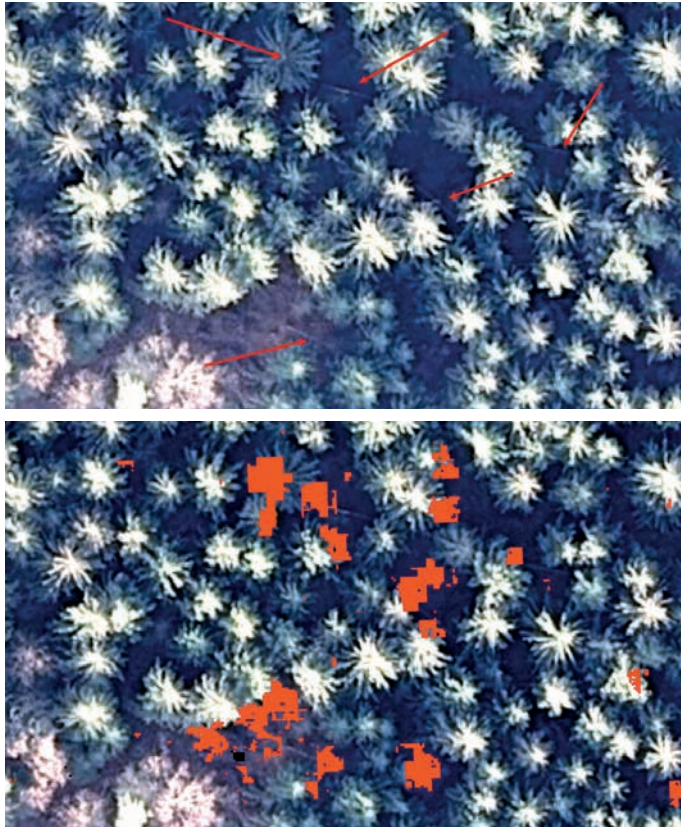


Abb. 19. RGB-Orthophoto mit umgestürzten Einzelbäumen und abgebrochenen Kronen (oben); überlagert mit fehlenden Bäumen in rot aus der Differenz von DOM 2018 und DOM 2016 (unten). Quelle: Luftbild und Umweltplanung 2018.

innerhalb einer Zeitreihe zu Unschärfen und Artefakten kommen. Die Kombination von Oberflächenmodellen unterschiedlicher Fernerkundungssensoren in einer Zeitreihe birgt zusätzliche Schwierigkeiten. Die absolute Lagegenauigkeit der verwendeten Oberflächenmodelle muss aufeinander abgestimmt sein und im selben Lage- und Höhensystem vorliegen.

5.4 Aktuelle Praxisbeispiele

5.4.1 Erfassung von Waldzustandsdaten für den Gesamtwald Sachsens

Im Auftrag des Staatsbetriebs Sachsenforst wurde ein Verfahren zur semiautomatisierten Erfassung von Waldzustandsdaten beziehungsweise Ableitung forstlicher Parameter aus Fernerkundungsdaten für den Gesamtwald Sachsens entwickelt (COENRADIE *et al.* 2012, 2013, 2014). Mittlerweile wurde diese Methode für etwa 70 Prozent der Waldfläche Sachsens angewandt.

Für die Kartierungen von Waldflächenzugängen und -abgängen, beschirmter und unbeschirmter Flächen, Bestandeshöhen, Wuchsklassen und Baumhöhenklassen, Baumartengruppen sowie Überhältern werden spektrale und texturale Merkmale ermittelt sowie Vegetationshöheninformationen analysiert. Die Grundlage bilden die beim Staatsbetrieb für Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) verfügbaren 16-Bit-Luftbilddaten sowie Laserdaten und die von ihnen abgeleiteten digitalen Höhenmodelle. Teilweise werden aus Luftbilddaten abgeleitete Oberflächenmodelle in den Auswerteprozess eingebunden. Fachinformationen des Forstlichen Geoinformationssystems (Forstgrunddaten, Forsteinrichtungsdaten) und die Daten des Waldinformationssystems werden im gesamten Auswertungsprozess integriert.

Die Verifizierung der Ergebnisse hat bestätigt, dass die Standarddaten des GeoSN prinzipiell zur Erfassung der von der Praxis geforderten Parameter geeignet sind. Die Laserdaten bewähren sich vor allem bei der Abgrenzung von Wuchs- und Baumhöhenklassen. Die Erfassung der Baumartengruppen ist aufgrund der radiometrischen Inhomogenitäten der digitalen Luftbild- und Orthophotodaten eingeschränkt möglich. Vergleiche der Auswertungsergebnisse von luftbild- und lasergenerierten Oberflächenmodellen zeigen, dass letztere derzeit zu detaillierteren und flächenschärferen Ergebnissen führen.

Die positive Resonanz aus der forstlichen Praxis belegt, dass die Informationstiefe und die Struktur der Daten für praktische Zwecke prinzipiell geeignet sind. Die Daten werden vor allem als wertvolle Ergänzung zur Vorbereitung der Beratung im Privatwald genutzt (HOFFMANN *et al.* 2017).

5.4.2 Oberflächenmodelle für die Forsteinrichtung

In Baden-Württemberg wurde von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) in Zusammenarbeit mit dem Referat 84 – Fachbereich Forsteinrichtung und Forstliche Geoinformation des Regierungspräsidiums Freiburg die sogenannte Waldhöhenstrukturkarte entwickelt.

Die auf der Basis der Stereoluftbilder berechneten und im 1x1 m-Raster vorliegenden nDOM beinhalten eine räumlich stark differenzierte Höheninformation der Bestandesoberflächen. Da Waldbestände eine recht raue Oberfläche aufweisen, werden Baumgipfel, Kronenrand und Bestandeslücken nebeneinander dargestellt und zeichnen ein für den Forsteinrichter schwer interpretierbares Bestandesmuster. Durch die Aggregation des jeweils höchsten Wertes in einem 5x5 m-Raster entsteht ein Bild, welches als wesentliche Information die Oberhöhe der Baumwipfel enthält. Die so reduzierte Information ist zusätzlich in 3 m-Höhenstufen klassifiziert und farblich differenziert dargestellt. Das Ergebnis ist die sogenannte Waldhöhenstrukturkarte, welche in Baden-Württemberg für die Forsteinrichtung eingesetzt wird. Über dieses Instrument können Bestände bereits vor den Begehungen durch die Einrichtenden im Büro treffsicher abgegrenzt werden.

Die Waldhöhenstrukturkarte wird in der Forsteinrichtungspraxis als ausgezeichnetes Instrument zur Entscheidungsunterstützung bei der Bestandesabgrenzung eingesetzt. So lassen sich nicht nur die Höhenunterschiede zwischen Beständen leichter erkennen, sondern auch Strukturen innerhalb der Bestände, wie zum Beispiel eine höhere Lärchen-/Douglasiengruppe oder räumige bis lückige Bestandespartien.

Aus der Kombination von Betriebsinventurdaten mit dem nDOM und einer auf Satellitendaten berechneten Laubanteilskarte wird modellgestützt eine Holzvorratskarte abgeleitet (Kap. 5.2). Sie stellt in einem kleinräumigen Raster (20x20 m) die Vorratsstruktur dar und kann zum Beispiel auf Bestände, Abteilungen oder Distrikte aggregiert werden (Abb. 21). Die Vorratskarte wird im Gegensatz zur Waldhöhenstrukturkarte aktuell nicht flächendeckend, sondern für Testgebiete berechnet.

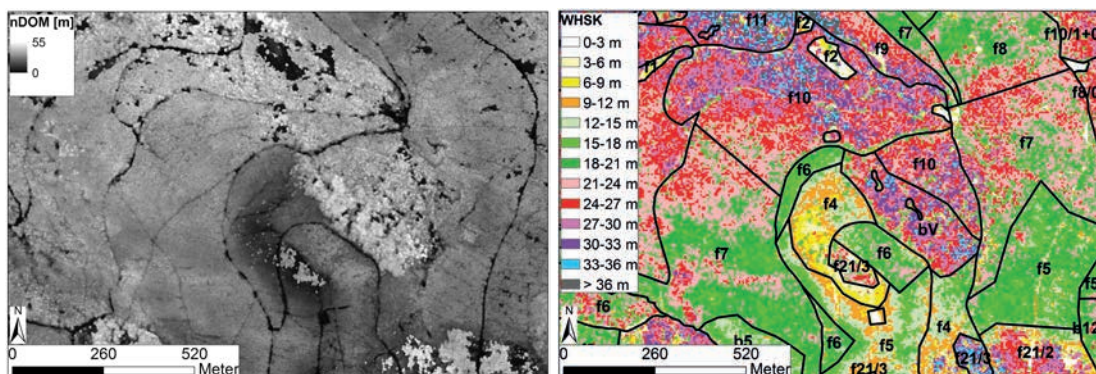


Abb. 20. nDOM (links) Waldhöhenstrukturkarte mit Bestandesabgrenzung (rechts). Quelle: P. Adler, FVA.

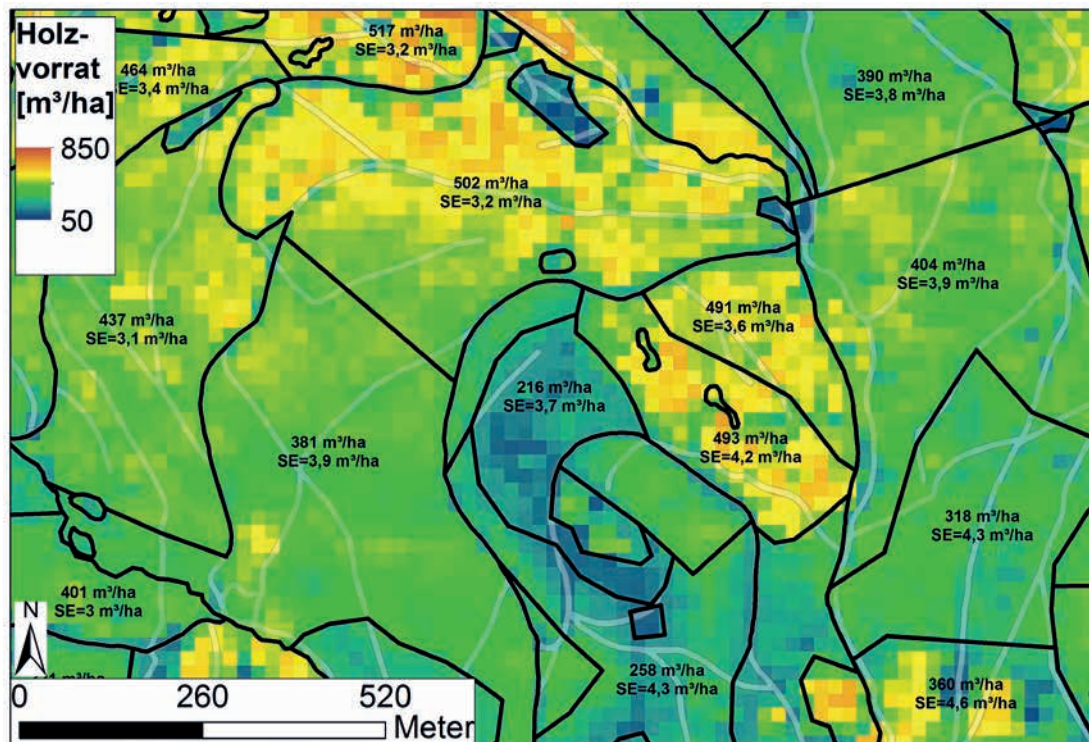


Abb. 21. Holzvorratskarte mit mittleren Vorräten und Standardfehlern pro Bestand. Quelle: P. Adler, FVA.

5.4.3 Waldmaske Schweiz und Österreich

Die digitalen Zeilensensoren ADS80/100 der swisstopo, daraus abgeleitete Oberflächenmodelle sowie der hohe Automatisierungsgrad bei der Datenprozessierung erlauben es, flächige Produkte wie das VHM (GINZLER und HOBI 2016), die Waldmaske (WASER *et al.* 2015) und den Waldmischungsgrad (WASER *et al.* 2017) effizient und mit hoher Genauigkeit im Rahmen des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) zu erstellen. Die hier kurz vorgestellte Waldmaske der Schweiz basiert auf dem VHM und der LFI-Walddefinition. Letztere umfasst die Parameter Höhe, Deckungsgrad, Breite beziehungsweise Fläche eines bewaldeten Gebietes und die Bodennutzung. Bis auf die Bodennutzung lassen sich alle Parameter, also messbare Größen, aus dem VHM ableiten. Ohne die Information der Bodennutzung werden aber temporär nicht bewaldete Gebiete (z. B. nach einem Sturmereignis) als Nichtwald detektiert. Andererseits können auch Bäume, die nicht forstlich genutzt werden (z. B. in Parkanlagen, Obstkulturen) aufgrund von ihrem Deckungsgrad oder ihrer Fläche als Wald ausgeschieden werden, obwohl sie wegen ihrer anderen Nutzung nicht dazu gezählt werden dürfen.

Das in WASER *et al.* (2015) genauer beschriebene Verfahren berechnet in einem ersten Schritt eine binäre Waldmaske, welche auf dem Hörschwellenwert von 3 m beruht. Der Deckungsgrad umfasst den Anteil der Pixel ≥ 3 m, welcher innerhalb der für die im LFI verwendeten Luftbildinterpretationsfläche liegt. Mittels eines Moving-Window-Ansatzes von 51×51 m wurde dies für jeden Quadratmeter der Fläche der Schweiz wiederholt und dabei allen Pixeln, bei welchem mindestens 20 Prozent der Pixel innerhalb der Interpretationsfläche eine Vegetationshöhe von ≥ 3 m aufweisen, die Kategorie Wald zugeordnet. Um die dadurch an den Waldrändern hervorgerufene Überschätzung zu minimieren, wurde an den Waldrändern die resultierende Fläche um 30 Prozent der Seitenlänge der Interpretationsfläche reduziert. Flächen mit einer Breite von weniger als 20 m wurden mittels morphologischer Filter weggeschnitten. Schliesslich wurde die Bodennutzung Wald aus dem Topographischen Landschaftsmodell (TLM) der swisstopo verwendet, damit temporär nicht-bestockte Flächen inkludiert beziehungsweise nicht-forstlich genutzte Bäume exkludiert werden.

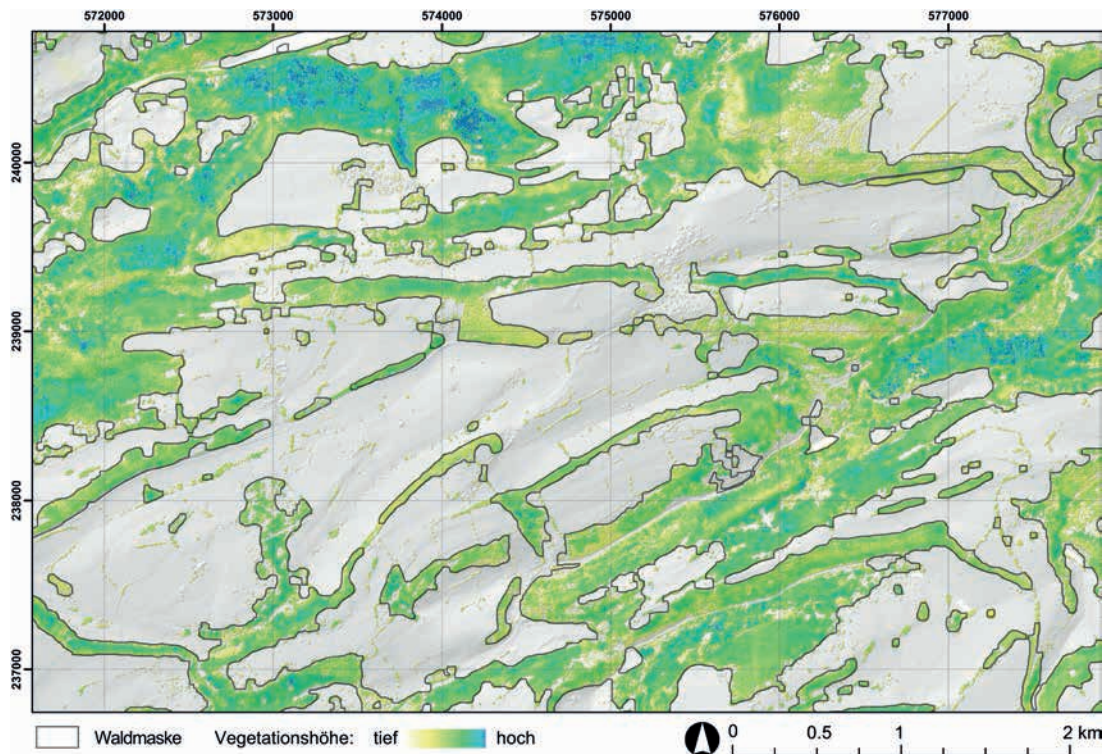


Abb. 22. Kartenausschnitt der LFI-Waldmaske sowie die aus dem VHM berechneten Vegetationshöhen. Quelle: GINZLER und HOBI (2016).

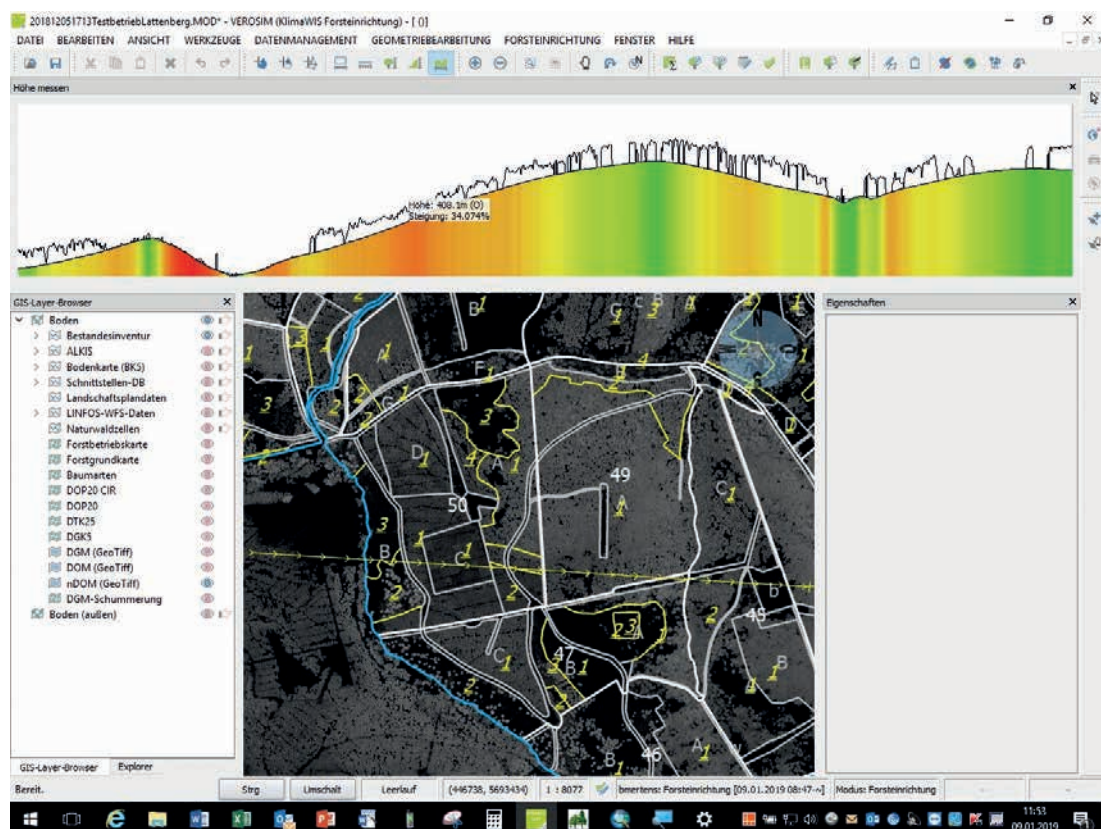


Abb. 23. KlimaWIS. NRW-Modul «Forsteinrichtung»: Baumhöhenkarte (nDOM) berechnet aus DGM1L und DOM1L und Höhenprofil (siehe gelbe Linie mit Pfeilsignatur).

Die automatisch generierte Waldmaske (Abb. 22) wird mit der Aktualisierung des VHM laufend erneuert. Die Einsatzmöglichkeiten der Waldmaske für forstliche und nicht-forstliche Zwecke sind vielfältig, insbesondere mit der Verschneidung von anderen Geodaten.

Für Österreich werden vom Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) auf die in Kapitel 5.1.1 beschriebene Weise hochgenaue Waldkarten mit grossem Massstab erstellt.

5.4.4 Moderne Informationstechnologien für die Forsteinrichtung und Waldbewirtschaftung

Das Klimadynamische Waldinformationssystem NRW – Modul: Forsteinrichtung (Klima-WIS.NRWFE) ist ein neu entwickeltes Geoinformationssystem (GIS) für die Forsteinrichtung, welches sowohl online im Büro als auch offline auf mobilen Outdoor-Computern im Wald eingesetzt werden kann. Mit dieser Technologie, die auch in Rheinland-Pfalz unter der Bezeichnung GRIPS RLP zum Einsatz kommt, werden die Waldinventur und die forstliche Planung auf eine neue technologische Grundlage gestellt.

So werden sämtliche für die Forsteinrichtung relevanten Geodaten mit den forstlichen Fachdaten der Forsteinrichtung in einer leistungsfähigen Datenbank zusammengeführt. Aus den amtlichen Laserscanning-Daten des DGM1L und DOM1L sowie aus den daraus berechneten nDOMDaten werden durch Verschneidung unmittelbar Daten für die Forsteinrichtung abgeleitet und visualisiert. So ist es beispielsweise möglich, ein Höhenprofil im Gelände inklusive einer Darstellung zum Aufwuchs zu erstellen (Abb. 23) oder für bestimmte Bildpixel mit einem Mausklick die Baumhöhe zu messen (Abb. 24).

Die Forsteinrichterinnen und Forsteinrichter haben damit alle für die Waldeinteilung und Zustandserfassung notwendigen Daten im Wald dabei. Sie werden durch wichtige zusätzliche Informationen bei der Arbeit unterstützt. Zustandserfassung und Bewirtschaftungsvorschläge können auf der Grundlage vollumfänglicher Informationen erfolgen. Darüber hinaus können auch Karten und Berichte zur Forsteinrichtung flexibel und automatisiert erstellt werden.

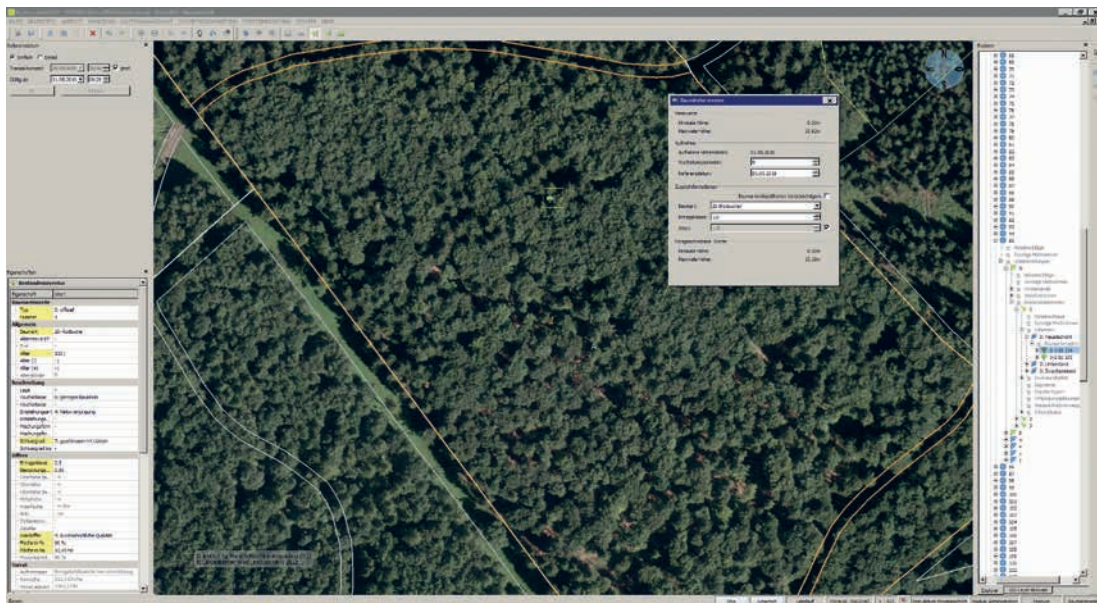


Abb. 24. Werkzeug zur Baumhöhenmessung (gemessene Fläche ist mit einem gelben Quadrat gekennzeichnet).

5.4.5 Automatisierte Erfassung von Sturmschadenflächen am Beispiel des Sommersturms «Kolle»

Am Abend des 18. August 2017 verursachte der Sturm Kolle in den Wäldern der Landkreise Passau und Freyung-Grafenau verheerende Schäden. Um die Lage, das Ausmass und die Art der eingetretenen Schäden möglichst präzise kartieren zu können, wurde von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) ein Bildflug zur Aufnahme von stereoskopischen Luftbildern mit einer räumlichen Auflösung von 20 cm in Auftrag gegeben. Das hierbei beflogene Gebiet hat eine Grösse von 900 km². Mittels dichten Bildzuordnungsverfahren konnte auf Grundlage dieser Luftbilder ein digitales Oberflächenmodell mit 1 m räumlicher Auflösung berechnet werden. Abbildung 25 zeigt einen kleinen Ausschnitt des Oberflächenmodells, welches mit dem zugehörigen CIR-Orthophoto eingefärbt wurde. Deutlich erkennbar ist die geschädigte Waldfläche. Durch den Vergleich mit einem Oberflächenmodell der Bayerischen Vermessungsverwaltung, welches die Waldsituation 14 Monate vor dem Sturm abbildet (siehe Beispiel in Abb. 26), konnten Sturmschadenflächen automatisiert extrahiert werden. Die Gegenüberstellung mit einer manuellen Kartierung der geschädigten Waldflächen zeigte gute Übereinstimmungen.



Abb. 25. Oberflächenmodell (1 m räumliche Auflösung) aus dem von der LWF beauftragten Bildflug (nach dem Sturm Kolle), eingefärbt mit dem zugehörigen CIR-Orthophoto. Deutlich erkennbar ist die geschädigte Waldfläche.

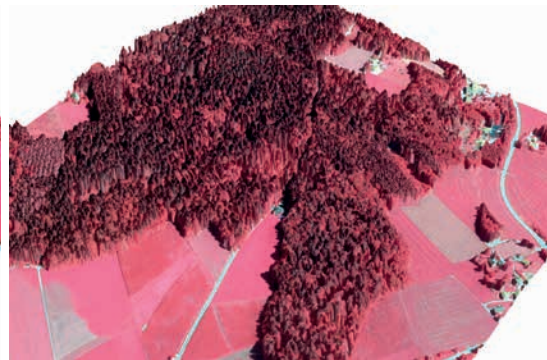


Abb. 26. Digitales Oberflächenmodell DOM der Bayerischen Vermessungsverwaltung (vor dem Sturm), eingefärbt mit dem zugehörigen CIR-Orthophoto.

5.4.6 Monitoring von Waldentwicklung in Naturwäldern (Brandenburg)

Eine georeferenzierte Versuchsflächenanlage und -aufnahme (Bestockung, Standort, Lichtökologie, Vegetation) kann unter Nutzung historischer Stereo-Luftbildpaare und aktueller Luftbilder beziehungsweise Laserscannerdaten die Waldentwicklung in Naturwäldern durch Visualisierung erklären (Abb. 27). Aufgrund der langen Entwicklungszeiträume wären diese sonst von einer Forschergeneration allein unmöglich zu beobachten.

Für eine weitere Ursache-Wirkungsanalyse lassen sich zusätzlich fachspezifische Geodaten (z. B. Geländere relief, Standortkarten) nutzen.

Abbildung 27 zeigt eine Zeitreihe von drei zum Teil historischen Vegetationshöhenmodellen von Versuchsflächen eines Naturwaldes. Die Erstaufnahme der Versuchsflächen war 1958/1968, zeitlich entsprechende Stereoluftbilder (Quelle: Bundesarchiv Berlin) waren vom 16.6.1970. Daraus wurde mit Agisoft Photoscan Professional eine DOM mit 1,6 m Pixelauflösung gerechnet (links). Aus einer Aufnahme vom 28.7.1991 wurde ebenfalls mittels Agisoft Photoscan Professional ein DOM mit 1 m Auflösung gerechnet (Mitte). Aus dem Jahr 2012 stammen Laserdaten, das daraus abgeleitete DOM hat ebenfalls eine Auflösung von 1 m (Quelle: LGB Brandenburg). Die in den Bildern (links und rechts) erkennbaren Nummern zeigen die terrestrisch eingemessenen und zugeordneten Kronen an.

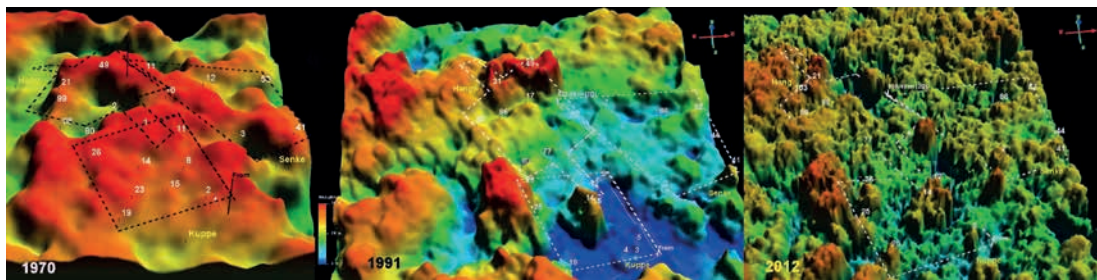


Abb. 27. Visualisierung einer Zeitreihe von Vegetationshöhenmodellen.

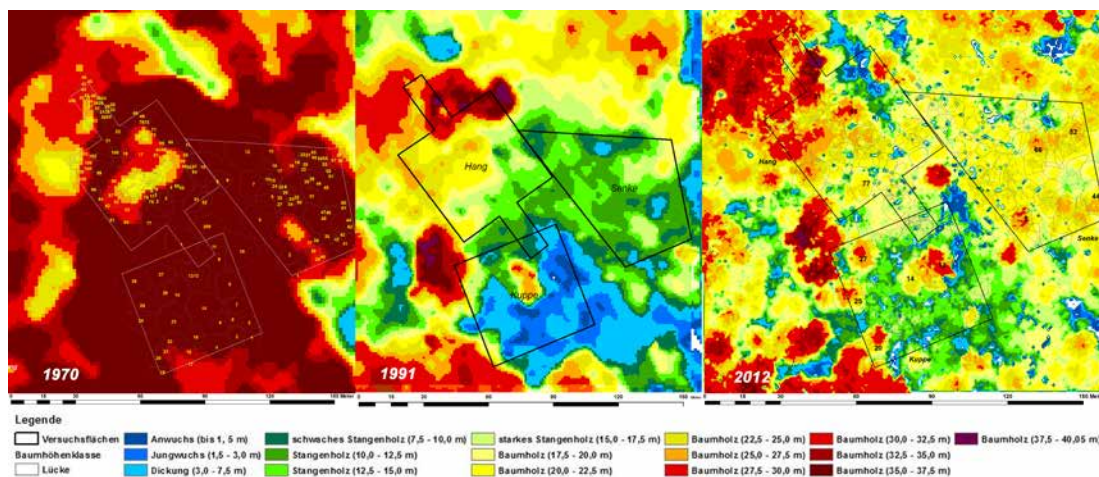


Abb. 28. Aus den Vegetationshöhenmodellen klassifizierte Baumhöhenklassen der Waldzustände 1970 (links), 1991 (Mitte) und 2012 (rechts).

Aus den Vegetationshöhenmodellen lassen sich auch Baumhöhenklassen ableiten (Abb. 28).

Durch deren nachfolgendes Aggregieren lassen sich Wuchsklassen und durch deren Veränderungsanalyse (change detection) Waldentwicklungsphasen objektiv ableiten (Abb. 28).

5.4.7 Monitoring des Grünvolumens für die Landeshauptstadt Potsdam in den Zeitschnitten 1992, 1998, 2004, 2010

Vor allem vor dem Hintergrund der Anpassungserfordernisse an den globalen Klimawandel entwickelt sich das Grünvolumen zu einem der wichtigsten umweltplanerischen Kernindikatoren. Mithilfe neuester technischer Verfahren ist die Firma LUP (Luftbild Umwelt Planung GmbH) in der Lage, regional und überregional präzise Zeitreihen für ein Grünvolumenmonitoring aufzubauen. Im Auftrag der Stadtverwaltung Potsdam wurde von LUP die Veränderung des realen Grünvolumens seit der politischen Wende in Potsdam untersucht. Das reale Grünvolumen ist eine Grösse aus der Landschaftsplanung und wird mittels der Grünvolumenzahl (GVZ) angegeben (SCHULZE *et al.* 1984). Sie bezeichnet das oberirdische Volumen des Grünraums aller auf einer Grundfläche stehenden Pflanzen. Das städtische Grünvolumen ist eine dreidimensionale Kenngrösse. Sie spielt eine grosse Rolle für die Lebens- und Umweltqualität von Städten und ist somit für die Stadtplanung von grosser Bedeutung. Je grösser das Vegetationsvolumen ist, desto stärker wirken Funktionen wie Staubbindung, Erhöhung der Verdunstung, Senkung der Temperatur, Sauerstoffproduktion, Beschattung usw. Dadurch ist das Grünvolumen auch für die Erholung von Bedeutung. Mithilfe der Indikatoren «Bodenversiegelung» und «Grünvolumen» kann der Umweltzustand gemessen werden (ARLT *et al.* 2005).



Abb. 29. Grünvolumen des Stadtteils Hemannsverder Potsdam. Quelle: LUP.

In einem ersten Schritt wurden die Referenzwerte des Grünvolumens auf Grundlage eines digitalen Oberflächenmodells der High Resolution Stereo Camera (HRSC) sowie einer Vegetationsklassifizierung und eines Geländemodells berechnet. Die Vegetationshöhe wurde durch die Subtraktion des Geländemodells vom Oberflächenmodell ermittelt. Diese berechneten Höhen und einige angenommenen Höhen für Vegetationsklassen mit niedrigem Bewuchs (z.B. für Schwimmblattgesellschaften oder Wiesen) wurden zur Ermittlung der Referenzwerte des Grünvolumens verwendet (Abb. 27).

5.4.8 Praxisbeispiel: Landschaftserfassung NATFLO-MAD

Im Projekt NATFLO (Fernerkundungsgestützte Landschaftsobjekte des Naturschutzes) werden im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (MUEEF) landesweit und flächendeckend sehr hoch auflösende Landbedeckungsdaten im Vektorformat erzeugt (Multifunktional Anwendbarer Datensatz – MAD). Der Einsatz digitaler Oberflächenmodelle aus LiDAR und Image Matching (LVerMGeo RLP) ermöglicht dabei den Schritt zu einer automatisierten, objektscharfen Erfassung der Landschaft. Vegetationsbestände in Wald und Offenland werden durch den Einsatz von DOM unterteilt und abgegrenzt, als Vektorobjekt gespeichert und mithilfe zahlreicher Attribute im Hinblick auf ihre physischen Merkmale wie Höhe, Höhenstruktur und Ausdehnung beschrieben. Zusätzlich zur Physis erhält jedes Objekt eine umfassende Beschreibung mit einer grossen Anzahl individueller Attributwerte zu Standort und zeitlichen Entwicklungen (bspw. Phänologie) durch die objektbezogene Auswertung digitaler Geländemodelle und weiterer Sensor- und Sachdaten (z.B. Zeitreihen Copernicus Sentineldaten). Die gemeinschaftliche algorithmenbasierte Auswertung unterschiedlicher Datenquellen bringt deren jeweiligen Vorteile zusammen und wird zur Ableitung von Eigenschaften landschaftlicher Objekte eingesetzt (z.B. Gehölztyp von Vegetationsobjekten oder Nutzungsintensität von Offenlandbereichen). Der Einsatz fernerkundlicher Daten soll herkömmliche Prozesse der Beschaffung naturschutzfachlich relevanter Daten unterstützen und ermöglicht eine zeitlich eng getaktete, flächendeckende Erfassung der Landschaft (Abb. 30).

Der Einsatz digitaler Oberflächenmodelle schafft dabei einen dreifachen Mehrwert. Er ermöglicht:

- die Automatisierung von GIS-basierten Erfassungsprozessen durch Einsatz der Höheninformation.
- die Nutzbarmachung der physischen Merkmale des Kronendachs zur direkten Beschreibung von Vegetationsobjekten.

- die Einbeziehung der physischen Merkmale von Vegetation in algorithmenbasierte Erkennungs- und Klassifikationsprozesse als wichtige Ergänzung zu Daten anderer Sensoren und Quellen (z. B. multispektrale Luft- und Satellitenbilder, Radardaten).

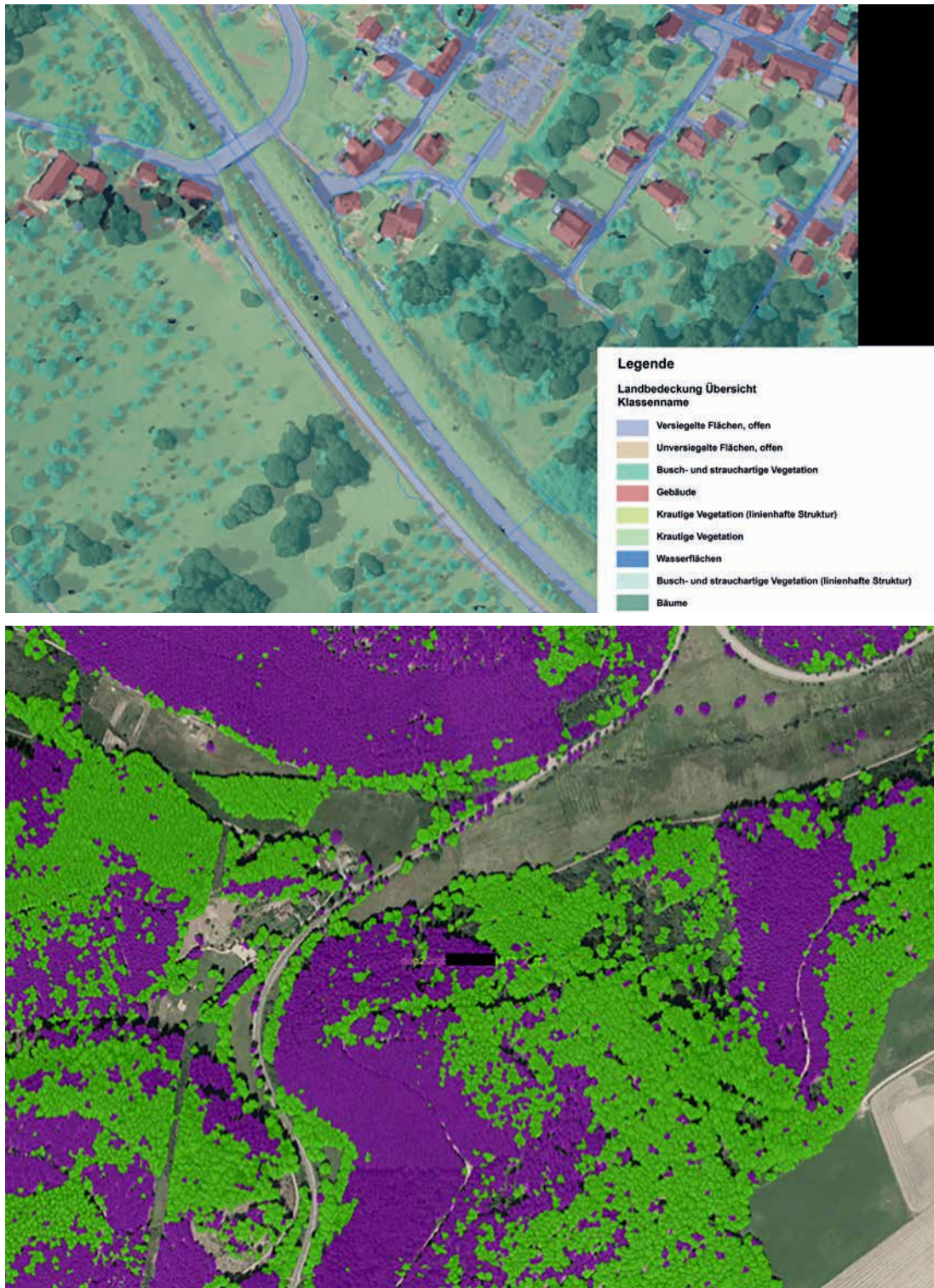


Abb. 30. NATFLO MAD (Bild oben) und Klassifikation von Gehölztypen im Pfälzer Wald (Bild unten; grün: Laubholz, violett: Nadelholz) auf Basis des MAD. Quelle: RLP Agrosience.

5.4.9 Erfassung von Auerhuhn relevanten Biotopstrukturen

An der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) wurde ein Verfahren zur luftbildbasierten, systematische Erfassung der für das Auerhuhn wichtigen Vegetationshöhenstrukturen entwickelt (Abb 31). Das hierfür entwickelte Programm nennt sich Auerhuhn-Tool.

Grundlage des Auerhuhn-Tools sind die vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg für die gesamte Landesfläche im dreijährigen Turnus aufgenommenen digitalen Stereoluftbilder. Das daraus abgeleitete nDOM mit einer Rasterauflösung von 1 m wird nach den in Tabelle 2 beschriebenen Definitionen analysiert.

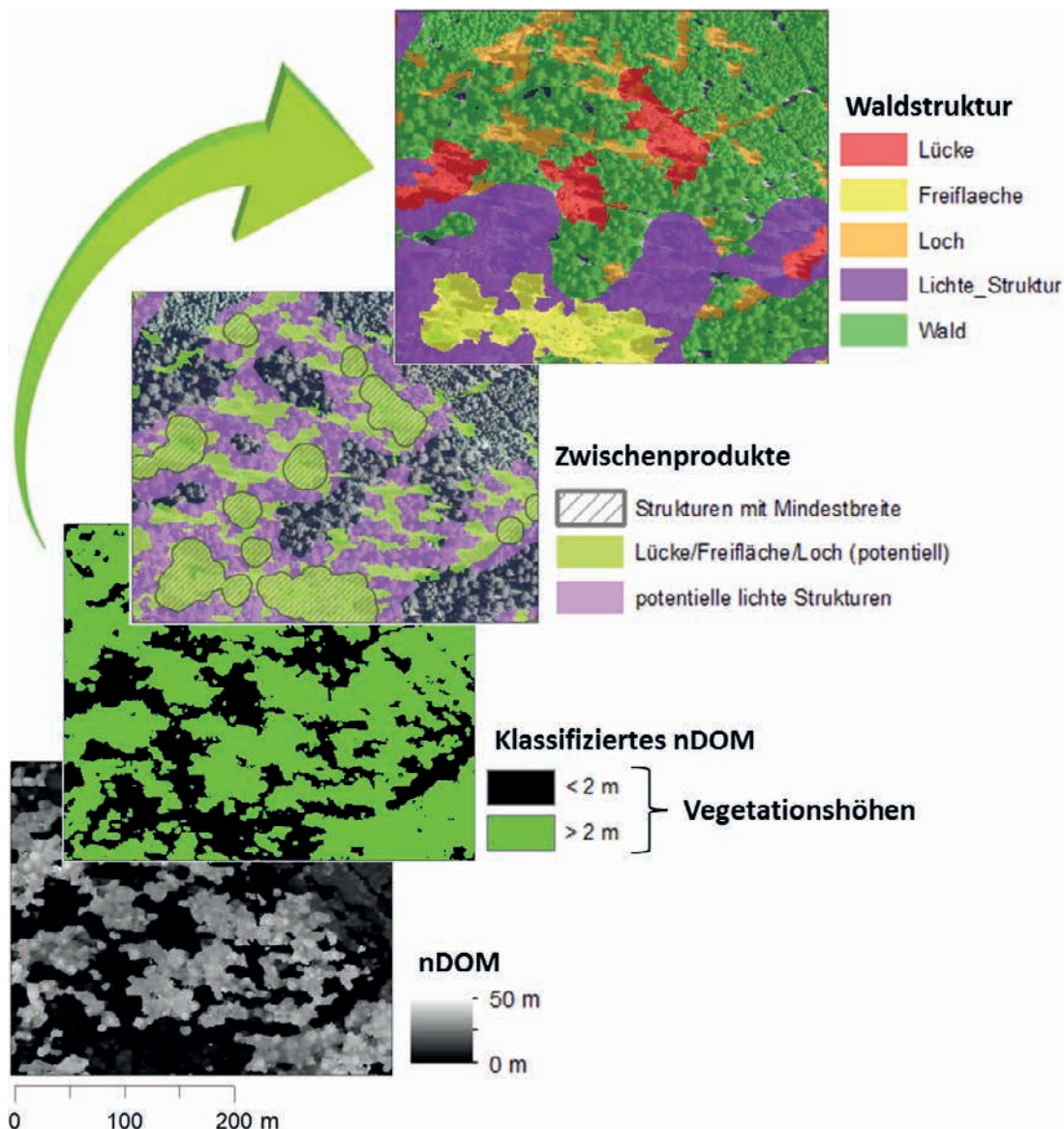


Abb. 31. Das Auerhuhn-Tool: schematischer Ablauf der Strukturerfassung. Quelle: S. Ganz, FVA.

Tab. 2. Begriffsdefinitionen des Auerhuhn-Tools: Vegetationshöhengrenze liegt für alle Strukturen bei zwei Meter.

Struktur	Überschirmung	Fläche [ha]	Oberhöhe [m]	Mindestbreite [m]	Zielgrössen Aktions- plan Auerhuhn
Lücke	< 20 %	0,1–0,5	< 10	10	10 %
Freifläche		> 0,5	10–20	20	
			> 20	30	
Lichte Struktur	20–70 %	> 1	-	50	20 %
Loch	< 20 %	> 0,01		-	

Im ersten Schritt wird das nDOM in die Klassen «Boden mit niedriger Vegetation» (<2 m) und «Bestand mit höherer Vegetation» (>2 m) eingeteilt. Benachbarte Boden-Pixel werden als gemeinsame Struktur betrachtet. Es entstehen Formationen, welche potenzielle Lücken/Freiflächen oder Löcher abbilden. Anschliessend wird die Oberhöhe der benachbarten Bestände berechnet und somit auf die geforderte Mindestbreite geschlossen. Nach der Überprüfung der Mindestbreite bleiben nur Strukturen übrig, welche die Mindestbreite erfüllen und bei ausreichender Flächengrösse zu Freifläche oder Lücke klassifiziert werden können. Strukturen, welche die Mindestbreite oder Mindestgrösse nicht erfüllen, gehen nicht verloren, sondern werden der Kategorie «Loch» zugeteilt, sofern sie grösser als 0,01 ha sind. Lichte Strukturen werden den Bereichen zugeordnet, welche die geforderte Überschirmung von 20 bis 70 Prozent und die Mindestgrösse von 1 ha erfüllen. Um schlauchförmige Strukturen an Waldwegen auszuschliessen, müssen auch lichte Strukturen eine Mindestbreite erfüllen.

6 Trägerplattformen für Luftbildkameras

Für die Erfassung von Luftbildern werden als Plattform klassischerweise Flugzeuge eingesetzt, die speziell für diese Aufgaben ausgestattet wurden. Aufgrund der technischen Entwicklungen (Sensortechnik, Miniaturisierung, Entwicklung der Rechenleistung usw.) in den letzten Jahren kommen immer stärker auch andere Plattformen zum Einsatz. So werden derzeit drei Systeme mit einer Kombination aus Plattform und Kamera verwendet:

1. Bemanntes Flugzeug mit Mittel- oder Grossbildkamera
2. Bemannte Kleinflugzeuge und Fluggeräte mit Mittel- oder Kleinbildkamera
3. Unbemannte Luftfahrzeuge mit Klein- oder Kleinstbildkamera

Alle drei Systeme sind von ihren Grundmodulen gleich aufgebaut und bestehen aus einem Fluggerät, einer oder mehreren Kameras, einem Auslöse- und Kontrollsystem, einem DGNSS und INS sowie Speichereinheiten. Die Systeme für Mittel- und Grosskameras besitzen darüber hinaus eine kreiselstabilisierte Plattform, um starke Verzerrungen infolge der Flugdynamik zu vermeiden. Diese Systeme unterscheiden sich in der Flächenleistung, der Traglast und der Flughöhe und haben ihren Stärken entsprechend unterschiedliche Einsatzfelder. Die Qualität der Oberflächenmodelle wird nicht allein von der eingesetzten Flugplattform bestimmt. Entscheidend ist die Qualität der Luftbilder (Schärfe, Belichtung, Radiometrie und hohe Überlappung) und die Genauigkeit der Positionsbestimmung (DGNSS und INS). Nur aus hochwertigen Daten können präzise DOM abgeleitet werden.

Eine hohe Professionalität beim Einsatz dieser Systeme sichert eine hohe Qualität der Daten und damit auch der Oberflächenmodelle. Hierauf ist besonders bei UAV-Befliegungen zu achten, da hier eine grosse Variabilität an Aufnahmesystemen und Sensoren angeboten wird. Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, müssen auch bei diesen Befliegungen die entscheidenden Parameter beachtet werden, damit die Daten für die Ableitung von Oberflächenmodellen verwendet werden können.

6.1 Bemannte Flugzeuge mit Mittel- oder Grossbildkamera

Bei dieser Variante sind überwiegend grossmotorige Flugzeuge mit grosser Reichweite im Einsatz, die im überwachten Luftraum, das heisst unter Kontrolle der Flugaufsicht, operieren. Die Flughöhe hängt stark von der eingesetzten Kamera ab (u. a. Brennweite) und liegt meist bei mehr als 1000 m über dem Boden. Aufgrund ihrer grossen Leistungsfähigkeit werden diese Systeme vornehmlich für grossflächige Befliegungen über 5000 ha eingesetzt.

Durch die hohe Traglast der Flugzeuge können grossformatige und auch zeitgleich mehrere Kameras eingesetzt werden. Diese Befliegungen werden aufgrund der hohen Investitionskosten ausschliesslich von Spezialfirmen durchgeführt.

6.2 Bemannte Kleinflugzeuge und Fluggeräte mit Mittel- oder Kleinbildkamera

Unter bemannten Kleinflugzeugen werden in diesem Kontext Fluggeräte wie Ultraleichtflugzeuge oder Gyrokooper verstanden. Die Fluggeräte operieren ebenfalls im überwachten Luftraum. Aufgrund ihrer im Vergleich zu grossmotorigen Flugzeugen geringeren Reichweite liegt der Einsatzbereich bei Flächengrössen von 2500 ha und bis zu max. 5000 ha pro Tag.

In diesen Fluggeräten werden eine oder mehrere Mittel- oder Kleinbildkameras eingesetzt. Gegenwärtig werden aufgrund der beschränkten Tragfähigkeit dieser Systeme überwiegend Drei-Kanal-Kameras (Echtfarben (RGB), Falschfarbeninfrarot (CIR)) eingesetzt. Durch Entwicklung und Vermarktung von kleinformatigen Multispektral-Kameras (RGB, Red-Edge, NIR) konnte der Aufgabenbereich dieser Trägersysteme in den letzten Jahren erweitert werden.

Interessant ist der Einsatz vor allem für kleine Gebiete und für Aufnahmen direkt nach Schadereignissen, da sie schnell einsetzbar sind und die Flugplanung ist spontan veränderbar. Die Flughöhe liegt bei diesem System zwischen 300 bis 1000 m über dem Boden. Somit kann auch unter sehr niedrigen Wolken geflogen werden.

Theoretisch können alle Luftfahrzeuge verwendet werden, die das notwendige Personal und die Aufnahmetechnik befördern können. Für die Praxis sind allerdings Fluggeräte ohne Motorantrieb weniger oder nicht geeignet, da die Flächenabdeckung nicht gewährleistet werden kann. Eingesetzt werden meist DGNSS/INS-Systeme, die nicht so hohe Anforderungen an die Genauigkeit stellen und im mittleren Preissegment liegen. Da hier zusammenhängende Gebiete befliegen werden, kann zusätzlich oder alternativ auch mit hochgenauen Passpunkten gearbeitet werden. Bei Befliegungen in Waldgebieten kann für die Bestimmung von hochgenauen Passpunkten die Flugplanung über angrenzende, bebaute Gebiete erweitert werden. Bei ausreichender Passpunktverteilung (Kap. 4.1.3) kann auf ein DGNSS/INS-System verzichtet werden.

6.3 Unbemannte Luftfahrzeuge mit Klein- und Kleinstbildkameras

In den letzten Jahren haben die Verbreitung und der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen/Drohnen, englisch «unmanned aerial vehicle» (UAV), stark zugenommen. Diese hat die Entwicklung im Bereich der Aufnahmesensorik stark vorangetrieben. UAVs operieren im unüberwachten Luftraum.

Die Rechtslage für den Einsatz von UAVs unterliegt einer starken Dynamik. Die Flughöhe über Grund ist gesetzlich begrenzt und liegt in Deutschland aktuell bei maximal 100 m (BMVI 2016). Im Wald schränkt die vorgeschriebene ständige Sichtbarkeit des Fluggerätes die Nutzung ein und hat einen häufigen Wechsel der Startplätze zur Folge. Dadurch und durch technische Begrenzungen (z. B. Akkukapazität) ist nur eine eingeschränkte Flächenleistung möglich (etwa 500 ha/Tag). Aus Sicht der Flächenleistung ist ein Tragflächenflugzeug gegenüber einem Drehflügler (Multicopter) zu bevorzugen, da es aufgrund des geringeren Energieverbrauchs für den Flug deutlich länger in der Luft bleiben kann. Allerdings müssen hierfür geeignete Landeplätze zur Verfügung stehen, was in Waldgebieten problematisch sein kann. Hierfür können Senkrechtstarter und -lander (englisch «VerticalTakeOff and Landing» – VTOL) eine mögliche Lösung bieten.

Aufgrund der geringen Traglast werden in UAVs nur Klein- oder Kleinstbildkameras eingesetzt. Eine Kombination von mehreren Sensoren pro Überflug ist meist nicht möglich. Eingesetzt werden heute RGB-, Multispektral-, Hyperspektral- und Thermalkameras. Durch die starke Miniaturisierung der Kameras ist die Qualität der Aufnahmesensoren nicht mit den Grossbildkameras zu vergleichen. Gleiches gilt für die eingesetzten DGNSS/INS-Systeme. Die Qualität der Systeme hat sich jedoch in den letzten Jahren sehr stark verbessert, was sich weiterhin fortsetzen dürfte.

Haupteinsatzgebiete sind neben Forschungs- und Entwicklungsaufgaben, Sonderaufgaben wie die Holzmengenbestimmung auf temporären Lagerplätzen (Nasslagern), Moorkartierungen usw.

7 Nutzung anderer Quellen für die Berechnung von Oberflächenmodellen

Alternativ zu stereoskopischen Luftbildern können zur Ableitung von Höheninformationen auch Daten von stereofähigen optischen Satelliten, flugzeuggetragenen Laserscannern sowie Radarsensoren eingesetzt werden. Diese Datensätze und daraus ableitbare Produkte werden im Folgenden kurz vorgestellt.

7.1 Stereofähige optische Satelliten

Unter der Voraussetzung, dass optische Satellitendaten stereoskopisch erfasst wurden, können diese zur Berechnung von Oberflächenmodellen verwendet werden. Analog zur Auswertung von Luftbildern werden hierbei Bildzuordnungsverfahren zur automatischen Höhendatenerfassung eingesetzt. Beispiele für optische Stereo-Satellitensysteme sind ASTER, WorldView-1 bis 3, GeoEye-1, Pléiades, Spot 6, Cartosat-2 oder Ziyuan-3. In den vergangenen Jahren konnten Höheninformationen der Erdoberfläche aus optischen Satellitendaten mit zunehmender Bodenauflösung und Genauigkeit gewonnen werden. Beispielsweise ermöglicht der kommerzielle Satellit WorldView-3 derzeit eine Bodenauflösung von 31 cm, was der Auflösung von Luftbildbefliegungen (häufig 10–20 cm) bereits sehr nahekommt. Weitere Vorteile sind die hohe zeitliche Auflösung und die grosse räumliche Abdeckung von einzelnen Satellitenaufnahmen. Voraussetzung für den Einsatz von optischen Satellitendaten sind eine gute Beleuchtungssituation beziehungsweise wolkenfreie Bedingungen zum Aufnahmezeitpunkt sowie ein nicht zu flacher Aufnahmewinkel. Je nach Satellitenkonstellation kann es zu Zeitdifferenzen zwischen den Aufnahmen eines Stereomodells kommen. Diese können die Qualität des abgeleiteten Höhenmodells beeinflussen. Da optische Satellitensysteme die reflektierte Sonnenstrahlung ausnutzen, zählt man diese Systeme zu den passiven Fernerkundungsverfahren. Umfangreiche Erläuterungen zum Thema Satellitenphotogrammetrie finden sich in JACOBSEN (2017).

7.2 Flugzeuggetragene Laserscannerdaten

Eine sehr präzise Technologie zur Gewinnung von Höhendaten der Erdoberfläche ist die flugzeuggetragene Laserscannermessung (ALS). Hierbei wird ein LiDAR-Messverfahren zur optischen, punktwisen Entfernungsmessung eingesetzt. Die Messung erfolgt mittels eines im Flugzeug eingebauten Scanners, welcher während des Fluges mit hoher Frequenz Laserlichtimpulse aussendet. Über die Fluggeschwindigkeit, Flughöhe und das Messsystem kann die Messpunktdichte beeinflusst werden, zum Beispiel kann diese zwischen 1 bis 50 und mehr Messpunkten pro m² liegen. Als Ergebnis der Laserscannermessung liegen zunächst unregelmässig verteilte 3D-Laserpunkte vor, welche häufig als Punktwolke bezeichnet werden.

In Waldgebieten erfolgt je nach Auftreffpunkt des Laserimpulses die Reflexion am Kronendach, an Zwischenschichten, an der Bodenvegetation oder direkt am Boden. Pro Impuls können auch mehrere Reflexionen erfasst werden. Somit können sowohl digitale Oberflächenmodelle als gegebenenfalls auch digitale Geländemodelle des Bodens unterhalb der Vegetation abgeleitet werden. Insbesondere die Möglichkeit der Berechnung von Geländemodellen aus den letzten beziehungsweise tiefsten Reflektionen der Lasermessung ist ein entscheidender Vorteil gegenüber bildbasierten Auswertungen. Ferner sind Laserscannersysteme (im Vergleich zu den optischen Aufnahmeverfahren) weniger wetter- und beleuchtungsabhängig, da die Laserscanner selbst (bzw. aktiv) Lichtimpulse aussenden. Deshalb zählt man die flugzeuggetragene Laserscannermessung zu den aktiven Fernerkundungsverfahren. Weiterführende allgemeine Informationen zur Laserscannermessung finden sich in PFEIFER *et al.* (2015) und zum Einsatz in der Forstwirtschaft in MALTAMO *et al.* (2014).

7.3 Radarfernerkundung

Eine weitere Fernerkundungstechnik zur Ableitung von Höhenmodellen ist Synthetic Aperture Radar (SAR), wobei Radar die Abkürzung für Radio detection and ranging ist. Vereinfacht dargestellt werden bei einem abbildenden Radarsystem mit synthetischer Apertur seitlich zur Flugrichtung Mikrowellenimpulse zur Erdoberfläche gesendet und die von dort rückgestreuten Signale empfangen. Dadurch ist die Radarfernerkundung (genauso wie die Laserscannermessung) ein aktives Verfahren. In Abhängigkeit vom verwendeten Spektralbereich unterscheidet man verschiedene Bänder, zum Beispiel X-Band (2,4–3,75 cm), C-Band (3,75–7,5 cm), L-Band (15–30 cm) oder P-Band (30–100 cm) (LILLESAND *et al.* 2008). Die Radartechnik zeichnet sich dadurch aus, dass die verwendeten Mikrowellen Wolken fast ungehindert durchdringen können. Dadurch ist diese Technologie weitgehend unabhängig vom Wetter und auch von der Tageszeit. Die Ableitung von Höheninformationen kann mittels SAR-Interferometrie (InSAR), Radargrammetrie und SAR-Tomographie erfolgen. Für interferometrische Auswertungen benötigt man zwei oder mehrere Aufnahmen eines Untersuchungsgebietes von unterschiedlichen Sensorpositionen. Abhängig von der verwendeten Wellenlänge kann man bei Vegetationsflächen entweder ein DGM (bei Verwendung eines langwelligen Spektralbereichs z. B. P-Band) oder ein DOM (bei Verwendung eines kurzwelligen Spektralbereichs z. B. X-Band) ableiten (SÖRGEL 2006). Ein Beispiel für die satellitengestützte Radarfernerkundung ist die TanDEM-X-Mission, welche auf den beiden baugleichen Radarsatelliten TerraSAR-X und TanDEM-X basiert. Ergebnis dieser Mission ist ein globales Oberflächenmodell mit 12 m räumlicher Auflösung und bis zu 2 m relativer Höhengenaugigkeit (ZINK *et al.* 2017). Für weiterführende Erläuterungen zu SAR wird auf BAMLER und EINEDER (2017) verwiesen.

8 Literatur

- ADLER, P.; NAAKE, T.; PETERS, S.; GINZLER, C.; BAUERHANS, C.; STEPPER, C., 2014: Reliability of forest canopy height extraction from digital aerial images. In: Proceedings of the ForestSAT Conference, Riva del Garda (TN), Italy, 4–7 November 2014.
- AFL, Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten, 2003: Luftbildinterpretationsschlüssel – Bestimmungsschlüssel für die Beschreibung von strukturreichen Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild. Landesforstpräsidium Sachsen. Schriftenreihe Nr. 26.
- AFL, Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten, 2012: Das digitale Luftbild, Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich. Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (Hrsg.). Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 7, Universitätsverlag Göttingen.
- ARLT, G., HENNERSDORF, J., LEHMANN, I.; XUAN THINH, N., 2005: Auswirkungen städtischer Nutzungsstrukturen auf Grünflächen und Grünvolumen. IÖR Schriften. Nr. 47. Dresden.
- BAMLER R., EINER M., 2017: Grenzen der Vermessung der Erde aus dem All mit Synthetischem Apertur Radar. In: HEIPKE C. (eds) Photogrammetrie und Fernerkundung. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg
- BMELV, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2011: Aufnahmeanweisung für die dritte Bundeswaldinventur (BMI³) (2011-2012). Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.) 2. geänderte Auflage, Mai 2011. Bonn, 107 S.
- BMELV, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2016: Neufassung der gemeinsamen Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung der Erlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtssystemen gemäß § 20 Absatz 1 Nummer 7 Luftverkehrsverordnung (LuftVO). Bonn, 19.07.2017 Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Referat LF 18: Nachrichten Für Luftfahrer 1-786-16
- BAYER, S., 2017: Automatisierte Einzelbaumextraktion im Forst: Analyse und Optimierung von Aufnahmeparametern und Prozessierungsschritten von Luftbildaufnahmen bis zum attribuierten Einzelbaum. FU Berlin, 229 S (Dissertation)
- BRASSEL, P.; LISCHKE, H., 2001: Swiss National Forest Inventory: methods and models of the second assessment, Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf. 336 p.
- COENRADIE, B.; HAAG, L.; KERSTING, M.; KENNEWEG, H., 2012: Erhebung von Waldzustandsdaten mit Methoden der Fernerkundung für den Gesamtwald im Freistaat Sachsen. Abschlussbericht zum Pilotprojekt im Auftrag des Staatbetriebes Sachsenforst. Berlin/Potsdam/Graupa.
- COENRADIE, B.; HAAG, L.; MÜLLER, K., 2013: Baumartenkartierung mit Methoden der Fernerkundung für den Forstbezirk Marienberg. Interner Abschlussbericht der Firmen Digitale Dienste Berlin und Luftbild Umwelt Planung GmbH zum Werkvertrag im Auftrag des SBS, Berlin/Potsdam.
- COENRADIE, B.; HAAG, L.; MÜLLER, K., 2014: Erfassung von Waldzustandsdaten mit Methoden der Fernerkundung für den Gesamtwald des Freistaates Sachsen – Oberlausitz, 1. Teilgebiet Görlitz. Interner Abschlussbericht der Firmen Digitale Dienste Berlin und Luftbild Umwelt Planung GmbH zum Werkvertrag im Auftrag des SBS, Berlin/Potsdam.
- FAO, Food and agriculture organization, 2012: FRA2015. Terms and definitions. Food and agriculture organization of the united nations. Forest Resources Assessment Working Paper 180. Rome 2015, 31 p.
- GINZLER, C.; HOBI, M.L., 2016: Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 167, 3: 128–135.
- HAALA, N.; ROTHERMEL, M., 2012: Dense Multi-Stereo Matching for High Quality Digital Elevation Models. Hochwertige Digitale Höhenmodelle aus dichter Mehrbildstereozuordnung Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 4: 331–343 (13).
- HAUK, E.; SCHADAUER, K. 2009: Instruktion für die Feldarbeit der Österreichischen Waldinventur 2007–2009. https://bfw.ac.at/700/pdf/DA_2009_Endfassung_klein.pdf
- HILDEBRANDT, G., 2010: Anfänge der forstlichen Luftbildmessung und -interpretation in Deutschland nach 1945. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation 4: 235–242.
- HIRSCHMUGL, M.; OFNER, M.; RAGGAM, J.; SCHARDT, M., 2007: Single tree detection in very high resolution remote sensing data. Remote Sensing of Environment 110 4: 533–544.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2005: Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference: IEEE. 807–814.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo processing by semi-global matching and mutual information. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on 30: 328–341.
- HO TONG MINH, D.; LE TOAN, T.; ROCCA, F.; TEBALDINI, S.; VILLARD, L.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; PHILLIPS, O. L.; FELDPAUSCH, T. R.; DUBOIS-FERNANDEZ, P.; SCIPAL, K. UND CHAVE, J., 2016: SAR tomography for the retrieval

- of forest biomass and height: Cross-validation at two tropical forest sites in French Guiana. *Remote Sens. Environ.* 175: 138–147.
- HOLLAUS, M.; WAGNER, W.; MAIER, B.; SCHADAUER, K., 2007: Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment. *Sensors* 7, 8: 1559–1577.
- HOFFMANN, K., 2014: Die Erfassung von Bestandesparametern mit Hilfe von Fernerkundung.-Vortragsveranstaltung der Arbeitsgruppe Forsteinrichtung. Weimar
- HOFFMANN, K.; COENRADIE, B.; HAAG, L.; NITZSCHE, V., 2017: Sachsenforst setzt auf Fernerkundung.- LWF aktuell 4: 26–29
- IÖST, A.; OEHMICHEN, K.; RIEDEL, T., 2010: Evaluierung satellitengestützter Stichprobenkonzepte für die Bundeswaldinventur. Berlin: Rhombos-Verlag, 236 S.
- JACOBSEN K., 2017: Satellitenphotogrammetrie. In: HEIPKE C. (eds) Photogrammetrie und Fernerkundung. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg
- KOTREMBÄ, C., 2014: Hochauflösende fernerkundliche Erfassung von Waldstrukturen im GIS. Am Beispiel der Kernzone «Quellgebiet der Wieslauter» im Pfälzerwald. *AFZ Der Wald* 9: 12–15.
- KRAMER, H.; AKCA, A., 2008: Leitfaden zur Waldmesslehre. 5., überarb. Aufl. Sauerländer Frankfurt am Main. 226 S.
- LE TOAN, T., 2007: Introduction to SAR Remote Sensing. ESA Advanced Training Course on Land Remote Sensing.
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J.W., 2008: Remote sensing and image interpretation, 6th ed. Wiley & Sons, 756 p.
- Luftbild Umwelt Planung, 2018: Automatisierte Erfassung von Sturmschäden mittels Oberflächenmodellen aus Stereo-Luftbildern. Bericht zum Werkvertrag im Auftrag des Staatbetriebes Sachsenforst. Potsdam/Graupa
- MALTAMO, M.; NÆSSET, E.; VAUHKONEN, J., 2014: Forestry Applications of Airborne Laser Scanning, Springer Netherlands, 464 p.
- NÆSSET, E., 2002: Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80, 1: 88–99.
- OEHMICHEN, K.; BAUERHANSL, C.; GINZLER, C.; KROIHER, F.; STRAUB, C.; WASER, L.T., 2016: Comparison of different definitions for wooded land using high resolution remote sensing techniques – a cross-country case study. In: WEZYK, P. (ed) 3rd EARSel Workshop SIG on Forestry and Young Scientist Days on Forestry Conference - Breaking dimensions and resolutions of forest remote sensing data, Krakow, September 15–16; book of abstracts. Krakow: University of Agriculture in Krakow, Faculty of Forestry, p 88.
- PFEIFER N., MANDLBURGER G., GLIRA P., 2015: Laserscanning. In: HEIPKE C. (eds) Photogrammetrie und Fernerkundung. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg
- SCHLIEPMANN, S.A.; BOCKHEIM, J.G., 2011: Methods for studying treefall gaps: A review. *Forest Ecology and Management* 261: 1143–1151.
- SCHULZE, H.-D.; POHL, W.; GROSSMANN, M., 1984: Gutachten: Werte für die Landschafts- und Bauleitplanung: Bodenfunktionszahl, Grünvolumenzahl. – Schriftenreihe der Behörde für Bezirksangelegenheiten, Naturschutz und Umweltgestaltung Freie Hansestadt Hamburg, 9. 1. Aufl. Christians. Hamburg.
- SIBONA, E.; VITALI, A.; MELONI, F.; CAFFO, L.; DOTTA, A.; LINGUA, E.; MOTTA, R.; GARBARINO, M., 2016: Direct Measurement of Tree Height Provides Different Results on the Assessment of LiDAR Accuracy. *Forests* 8: 1–12.
- SÖRGEL, U., 2006: Festschrift «125 Jahre Geodäsie und Geoinformatik»: Stand der Technik und Trends der Radarfernerkundung 26: 295–302.
- Staatsbetrieb Sachsenforst (Hrsg.), 2011: Arbeitsanleitung zur bestandesweisen Zustandserfassung und Planung (AA WAB). Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft, Referat Forsteinrichtung, Waldbewertung, Waldinventuren Graupa, 53 S.
- STRAUB, C.; STEPPER, C.; SEITZ, R.; WASER, L.T., 2013: Potential of UltraCamX stereo images for estimating timber volume and basal area at the plot level in mixed European forests. *Canadian Journal of Forest Research* 43: 731–741.
- STRAUB, C.; STEPPER, C.; SEITZ, R., 2014: Waldflächenermittlung mithilfe amtlicher Stereo-Luftbilder, *AFZ* 4: 4–7.
- STEPPER, C.; STRAUB, C.; PRETZSCH, H., 2014: Photogrammetrische Schätzung und Regionalisierung forstlicher Kenngrößen. Präsentation bei der DGPF-Jahrestagung 2014, HafenCity Universität Hamburg.
- ULLAH, S.; ADLER, P.; DEES, M.; KOCH, B., 2015: Evaluating the Potential of Stereo Aerial Photographs for Canopy Height Model Generation. *Forstliche Forschungsberichte München* 214: 79–86
- WANG, Z.; GINZLER, C.; WASER, L.T., 2015: A novel method to assess short-term forest cover changes based on digital surface models from image-based point clouds. *Forestry* 88: 429–440.

- WASER, L.T.; FISCHER, C.; WANG, Z.; GINZLER, C., 2015: Wall-to-Wall Forest Mapping Based on Digital Surface Models from Image-Based Point Clouds and a NFI Forest Definition. *Forests* 6: 4510–4528.
- WASER, L.T.; GINZLER, C.; REHUSH, N., 2017: Wall-to-Wall Tree Type Mapping from Countrywide Airborne Remote Sensing Surveys. *Remote Sensing* 9: 766.
- WHITE, J.C.; WULDER, M.A.; VARHOLA, A.; VASTARANTA, M.; COOPS, N.C.; COOK, B.D.; PITT, D.; WOODS, M., 2013: A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. – Canadian Wood Fibre Centre, Victoria, BC, Canada. <http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=34887>
- WSL, 2013: Schweizerisches Landesforstinventar Feldaufnahme-Anleitung 2013. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. 214 S.
- ZIELEWSKA-BÜTTNER, K.; ADLER, P.; EHMANN, M.; BRAUNISCH, V., 2016a: Automated Detection of Forest Gaps in Spruce Dominated Stands Using Canopy Height Models Derived from Stereo Aerial Imagery. *Remote Sensing* 8: 175.
- ZIELEWSKA-BÜTTNER, K.; ADLER, P.; PETERESEN, M.; BRAUNISCH, V., 2016b: Parameters Influencing Forest Gap Detection Using Canopy Height Models derived from Stereo Aerial Imagery, 3. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF. Bern, Schweiz, 2016; Kersten, T.P., Ed. Publikationen der DGPF: Bern, Schweiz, S. 405–416.
- ZINK, M.; Bachmann, M.; Bräutigam, M.; Fritz, T.; Hajnsek, I.; Krieger, G.; Moreira, A.; Wessel, B., 2017: TanDEM-X. In: HEIPKE C. (ed.) *Photogrammetrie und Fernerkundung*. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.

9 Relevante Normen und Standards

DIN 18716: Photogrammetrie und Fernerkundung-Begriffe

- DIN 18740: Photogrammetrische Produkte bestehen aus
 - Teil 3: Anforderungen an das Orthobild
 - Teil 4: Anforderungen an digitale Luftbildkameras und digitale Luftbilder
 - Teil 5: Anforderungen an die Klassifizierung optischer Fernerkundungsdaten
 - Teil 6: Anforderungen an digitale Höhenmodelle
 - Teil 7: Anforderungen an das Pansharpening
- DIN ISO 2859: Annahmestichprobenprüfung anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler (Attributprüfung) – Teil 1: Nach der annehmbaren Qualitätsgrenzlage (AQL) geordnete Stichprobenpläne für die Prüfung einer Serie von Losen
- DIN EN ISO 19115 Geoinformation-Metadaten – Teil 1: Grundsätze
- VDI 3793/3: Erfassung und Monitoring von Bäumen und Waldbeständen anhand digitaler Luftbildaufnahmen – Planung und Durchführung digitaler Bildflüge

10 Abkürzungen

3D	Dreidimensional
ALS	Airborne Laser Scanning
CIR	Color Infrared (auch IRC), Falschfarbeninfrarot (3-Kanal-Aufnahme)
DGM	Digitales Geländemodell (synonym: DTM)
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DOM	Digitales Oberflächenmodell (synonym: DSM)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GIS	Geographisches Informationssystem
INS	Inertiales Navigationssystem
LFI	Landesforstinventar (Schweiz)
LiDAR	Light Detection and Ranging (Laserscanning)
nDOM	Normalisiertes digitales Oberflächenmodell
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahes Infrarot
RADAR	Radio Detection and Ranging
RGB	Rot-Grün-Blau (3-Kanal-Aufnahme)
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar mit synthetischer Apertur)
SGM	Semi-Global Matching
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Drohne, unbemanntes Luftfahrzeug)
VHM	Vegetationshöhenmodell

11 Glossar

Artefakt: Im Zuge von Entzerrungsverfahren oder bei der Überbrückung von Datenlücken (z. B. sichttote Räume) entstehen bei der Umbildung von digitalen Original-Luftbilddaten Bildeffekte, die keine inhaltliche Bedeutung besitzen.

DGNSS: Abkürzung für Differential Global Navigation Satellite System als Oberbegriff für weltweite, satellitengestützte Systeme zur Positionsbestimmung auf oder über der Erdoberfläche.

Digitales Geländemodell (DGM): Numerisches Höhenmodell der Erdoberfläche ohne Berücksichtigung darauf befindlicher natürlicher und künstlicher Objekte (z. B. Vegetation oder Bebauung). Die englische Bezeichnung ist Digital Terrain Model (DTM).

Digitales Oberflächenmodell (DOM): Numerisches Höhenmodell der Erdoberfläche unter Einbeziehung darauf befindlicher natürlicher oder künstlicher Objekte (z. B. Vegetation oder Bebauung). Die englische Bezeichnung ist Digital Surface Model (DSM).

Image Matching: automatisierte Verfahren der Bildkorrelation

Kronenhöhenmodell (KHM): normalisierte Höhe des Kronendaches aus der Differenz zwischen digitalem Geländemodell und digitalem Oberflächenmodell innerhalb von Wald bzw. Gehölzflächen. Die englische Bezeichnung ist Canopy Height Model (CHM).

INS: Abkürzung für Inertial Navigation System. INS-Systeme werden zusammen mit GNSS-geräten bei Befliegungen für die Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung eingesetzt. Sie sind eine wesentliche Voraussetzung für die Ermittlung qualitativ hochwertiger Orientierungsparameter.

No-Data-Bereich: Bereich eines Bildes oder Höhenmodells ohne Information

Normalisiertes Oberflächenmodell (nDOM): Numerische Höhen aus der Differenz zwischen digitalem Geländemodell und digitalem Oberflächenmodell. Damit wird die tatsächliche Höhe von allen Objekten (z.B. Vegetation oder Bebauung) über der Geländeoberfläche wiedergegeben.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Messgrösse zur Bestimmung von Greenness der Vegetation, mit Werten zwischen $-1,0$ und $+1,0$, aus den Reflexionswerten im nahen Infrarotbereich und des roten sichtbaren Bereichs des Lichtspektrums.

Semi-Global Matching (SGM): Image-Matching-Verfahren, das durch seinen semi-globalen Ansatz lokale Punktkorrespondenzen abschätzt und global aufeinander bezieht.

True Orthophoto: Orthophoto erstellt auf der Basis von einem Oberflächenmodell, idealerweise aus den Stereo-Modellen des dargestellten Geländeausschnitts abgeleitet.

Vegetationshöhenmodell (VHM): Normalisierte Vegetationshöhe aus der Differenz zwischen digitalem Geländemodell und digitalem Oberflächenmodell. Alle Objekte, die nicht zur Vegetation zählen, werden dabei entfernt (z. B. Ausmaskieren von Gebäudeflächen).

12 Autoren

Jörg Ackermann

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstr. 2
D 37079 Göttingen
joerg.ackermann@nw-fva.de

Dr. Petra Adler

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhalde 4
D 79100 Freiburg
Petra.Adler@forst.bwl.de

Christian Aufreiter

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft
Seckendorff-Gudent Weg 8
A 1131 Wien
christian.aufreiter@bfw.gv.at

Christoph Bauerhansl

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft
Seckendorff-Gudent Weg 8
A 1131 Wien
christoph.bauerhansl@bfw.gv.at

Tilman Bucher

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Optische Sensorsysteme
Sensorkonzepte und Anwendungen
Rutherfordstr. 2
D 12489 Berlin-Adlershof
tilman.bucher@dlr.de

Dr. Stefan Franz

Landesbetrieb Wald und Holz NRW
IT, Zentrale Dienste
Albrecht-Thaer-Strasse 34
D 48147 Münster
Stefan.Franz@wald-und-holz.nrw.de

Friedrich Engels

Landesforsten Rheinland-Pfalz
Zentralstelle der Forstverwaltung
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft
Hauptstr. 16
D 67705 Trippstadt
friedrich.engels@wald-rlp.de

Christian Ginzler

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
Zürcherstr. 111
CH 8903 Birmensdorf
christian.ginzler@wsl.ch

Karina Hoffmann

Staatsbetrieb Sachsenforst
Bonnewitzer Strasse 34

D 01796 Pirna OT Graupa
Karina.Hoffmann@smul.sachsen.de

Kai Jütte

Landesforst Mecklenburg-Vorpommern AöR
Betriebsstelle Forstplanung, Versuchswesen, FIS
Sachgebiet Fernerkundung
Zeppelinstr. 3
D 19061 Schwerin
Kai.Juette@lfoa-mv.de

Prof. Dr. Hartmut Kenneweg

TU Berlin Fak. VI
Inst. f. Landschaftsarchitektur und Umweltplanung
Strasse des 17. Juni 145 EB 5
D 10623 Berlin
kenneweg@ile.tu-berlin.de

Luftbild Umwelt Planung GmbH

Grosse Weinmeisterstr. 3a
D 14469 Potsdam
hartmut.kenneweg@LUP-UMWELT.de

Dr. Tatjana Koukal

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft
Seckendorff-Gudent Weg 8
A 1131 Wien
tatjana.koukal@bfw.gv.at

Dr. Klaus Martin

Sachverständigenbüro für Luftbildauswertung und Umweltfragen
Kohlsteiner Strasse 5
D 81243 München
klaus.martin.slu@t-online.de

Dr. Katja Oehmichen

Thünen-Institut für Waldökosysteme
Alfred-Möller-Strasse 1
D 16225 Eberswalde
katja.oehmichen@thuenen.de

Dr. Olaf Rüffer

Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde
Alfred-Möller-Strasse 1
D 16225 Eberswalde
Olaf.Rueffer@lfb.brandenburg.de

Herbert Sagischewski

ThüringenForst – AöR
Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha
Jägerstr. 1
D 99867 Gotha
herbert.sagischewski@forst.thueringen.de

Rudolf Seitz

Bayerische Landesanstalt
für Wald und Forstwirtschaft
Abteilung 1, Informationstechnologie

Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1
D 85354 Freising
Rudolf.Seitz@lwf.bayern.de

Dr. Christoph Straub

Bayerische Landesanstalt
für Wald und Forstwirtschaft
Abteilung 1, Informationstechnologie
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1
D 85354 Freising
christoph.straub@lwf.bayern.de

Gregor Tintrup

RLP AgroScience GmbH
Institut für Agrarökologie
Breitenweg 71
D 67435 Neustadt
gregor.tintrup@agrosience.rlp.de

Dr. Lars Waser

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Zürcherstr. 111
CH 8903 Birmensdorf
waser@wsl.ch

Katarzyna Zielewska-Büttner

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhaldestr. 4
D 79100 Freiburg
katarzyna.zielewska-buettner@forst.bwl.de

Verzeichnis der neusten WSL Berichte

Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Hydrologisches Jahr 2018/19. Zweifel, B.; Lucas, C.; Hafner, E.; Techel, F.; Marty, C.; Stucki, T., 2020: WSL Ber. 86. 134 S.

Zustand und Entwicklung der Biotope von nationaler Bedeutung: Resultate 2011–2017 der Wirkungskontrolle Biotopschutz Schweiz. Bergamini, A.; Ginzler, C.; Schmidt, B.R.; Bedolla, A.; Boch, S.; Ecker, K.; Graf, U.; Küchler, H.; Küchler, M.; Dosch, O.; Holderegger, R., 2019: WSL Ber. 85. 104 S.

Forum für Wissen 2019. Schweiz erneuerbar! Bjørnsen Gurung, A. (Red.), 2019. WSL Ber. 84: 45 S.

Si-tuazione fitosanitaria dei boschi 2018. Queloz, V.; Forster, B.; Beenken, L.; Stroheker, S.; Odermatt, O.; Hölling, D.; Meyer, J.B.; Dubach, V., 2019. WSL Ber. 83: 33 p.

Pro-tecti-on des forêts – Vue d'ensemble 2018. Queloz, V.; Forster, B.; Beenken, L.; Stroheker, S.; Odermatt, O.; Hölling, D.; Meyer, J.B.; Dubach, V., 2019. WSL Ber. 82: 33 p.

Werkzeugkasten Naturschutzgenetik: eDNA Amphibien und Verbund. Holderegger, R.; Stapfer, A.; Schmidt, B.; Grünig, C.; Meier, R.; Csencsics, D.; Gassner, M., 2019. WSL Ber. 81. 56 S.

Analyse des évènements de la situation avalancheuse de janvier 2018. Bründl, M.; Hafner, E.; Bebi, P.; Bühler, Y.; Margreth, S.; Marty, C.; Schaer, M.; Stoffel, L.; Techel, F.; Winkler, K.; Zweifel, B.; Schweizer, J., 2019. WSL Ber. 80. 162 S.

Waldschutzüberblick 2018. Queloz, V.; Forster, B.; Beenken, L.; Stroheker, S.; Odermatt, O.; Hölling, D.; Meyer, J.B.; Dubach, V., 2019. WSL Ber. 79. 33 S.

Lernen aus Extremereignissen. Forum für Wissen 2019, Davos. Bründl, M.; Schweizer, J. (eds), 2019. WSL Ber. 78. 73 S.

Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Hydrologisches Jahr 2017/18. Winkler, K.; Zweifel, B.; Marty, C.; Techel, F., 2019. WSL Ber. 77. 135 S.

Ereignisanalyse Lawinensituation im Januar 2018. Bründl, M.; Hafner, E.; Bebi, P.; Bühler, Y.; Margreth, S.; Marty, C.; Schaer, M.; Stoffel, L.; Techel, F.; Winkler, K.; Zweifel, B.; Schweizer, J., 2019. WSL Ber. 76. 162 S.

Geschäftsbericht. Eidg. Forschungsanstalt WSL 2018. Eidg. Forschungsanstalt WSL (Hrsg.) 2019. WSL Ber. 75. 78 S.

Naturgefahr Steinschlag – Erfahrungen und Erkenntnisse. Gerber, W., 2019. WSL Ber. 74. 149 S.

Naturnahe Freiräume in der Schweiz: Analysekonzept, Identifizierung und raumplanerische Sicherung? Nischik, G.; Pütz, M., 2018. WSL Ber. 73: 80 S.

TreeNet – Daten und Analysen der ersten fünf Messjahre. Etzold, S.; Zweifel, R.; Haeni, M.; Burri, S.; Braun, S.; Walthert, L.; Dawes, M.; Buchmann, N.; Haeler, E.; Köchli, R.; Schaub, M.; Eugster, W., 2018. WSL Ber. 72. 69 S.

Energiegenossenschaften in der Schweiz: Ergebnisse einer Befragung. Rivas, J.; Schmid, B.; Seidl, I., 2018. WSL Ber. 71. 106 S.

Situazione fitosanitaria dei boschi 2017. Queloz, V.; Dubach, V. (Ed.), 2018. WSL Ber. 70. 35 S.

Bases stationnelles pour la gestion forestière face au changement climatique. Frehner, M.; Brang, P.; Kaufmann, G.; Küchli, C., 2018. WSL Ber. 69. 44 S.

Protection des forêts – vue d'ensem ble 2017. Queloz, V.; Dubach, V. (Ed.), 2018. WSL Ber. 68. 35 S.

Waldschutzüberblick 2017. Queloz, V.; Dubach, V. (Ed.), 2018. WSL Ber. 67. 35 S.

Standortkundliche Grundlagen für die Waldbewirtschaftung im Klimawandel. Frehner, M.; Brang, P.; Kaufmann, G.; Küchli, C., 2018. WSL Ber. 66. 49 S.